МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – 704 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 29-31 января 2020 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 1 декабря 2019 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2648-4

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020*

Подписано в печать 22.01.2020. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 44. Тираж 340 экз. Заказ №1.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
Типография НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатели:

Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Евтихиев Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Альтшулер Г.Б. – Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США

Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Габитов И.Р. – Университет Аризоны, Тусон, США

Десятников А.С. – Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия

Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва

Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Криштоп В.В. – Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Маломед Б. – Тель-авивский университет, Израиль

Одиноков С.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск

Фетисов Ю.К. – Российский технологический университет (МИРЭА)

Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Кузнецов А.П. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ученый секретарь:

Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес в Интернет: http://fioconf.mephi.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

РОМАШКО Р.В.
Адаптивная лазерная интерферометрия в акустических измерениях.....29
КОЗЛОВ С.А., МЕЛЬНИК М.В., ЖУКОВА М.О., ВОРОНЦОВА И.О., ПУТИЛИН С.Э., ЦЫПКИН А.Н., ЖАНГ С.-Ч., БОЙД Р.
Высокая нелинейность показателя преломления ряда жидкостей в терагерцовом спектральном диапазоне.....31
СТАРИКОВ Р.С.
Аналого-цифровые фотонные устройства для радиотехнических систем.....33
МАКСИМЕНКО В.А.
Особенности кинетики фотоиндуцированного рассеяния света в кристалле $LiNbO_3$:Fe в случае предварительного облучения некогерентным светом.....35
САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., СМИРНОВ С.В., ДУБИКОВ А.В., ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А.
Дифракция света на регулярной доменной структуре с наклонными стенками в кристалле ниобата лития в приложенном постоянном электрическом поле.....37
СМИРНОВ М.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ПИКУЛЕВ В.Б.
Особенности фотолюминесценции монокристаллов ниобата лития разного состава и генезиса.....39
ШУГУРОВ А.И., БОДРОВ С.Б., БАКУНОВ М.И.
Эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн при вырожденной ориентации кристалла ниобата лития.....41
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И.
Деградация платиновых пленок на поверхностях монокристаллов при нагреве.....43
ЧИЖИКОВ А.И., ЮШКОВ К.Б., МОЛЧАНОВ В.Я.
Акустооптический модулятор на основе кристалла $NaBi(MoO_4)_2$.....45
ЖУРИН Т.А., ШАНДАРОВ С.М., СИМ Е.С., КИСТЕНЕВА М.Г.
Дифференциальные характеристики спектров пропускания кристаллов класса силленитов.....47
НОВОКОВСКАЯ А.Л., КУРНИКОВ М.А., БАКУНОВ М.И.
Преобразование терагерцовых импульсов на фронте ионизации в кристалле GaP.....49
КУРНИКОВ М.А., БАКУНОВ М.И.
Оптико-терагерцовое преобразование в кристалле ZnTe в режиме генерации свободных носителей.....51
НИКОЛАЕВ Н.А., МАМРАШЕВ А.А., АНДРЕЕВ Ю.М., ЛАНСКИЙ Г.В.
Оптические свойства кристалла трибората висмута и перспективы применения в терагерцовом спектральном диапазоне.....53

АМАНОВА М.А., ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., МАКАРЕВИЧ А.В., НАВНЫКО В.Н.
Изучение вкладов обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности в дифракционную эффективность голограмм, сформированных в фоторефрактивном кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$.....55
БОЛДЫРЕВ К.Н., СУЛЕЙМЕН Е., ПОПОВА М.Н.
Антипересечение сверхтонких уровней в спектрах люминесценции в $LiYF_4$:Ho^{3+}.....57
МИСЬКЕВИЧ А.И., ПОДКОПАЕВ А.В.
Влияние буферных газов на спектральные характеристики люминесценции газовых смесей Ar-Xe-$C_2HBrClF_3$ и Ne-Xe-$C_2HBrClF_3$ возбуждаемых осколками деления урана.....59
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П., НИКИТИН В.А.
Изменение структуры Al_2O_3 при регистрации его безэлектролизной электролюминесценции.....61
КОНСТАНТИНОВА Е.И., СЛЕЖКИН В.А., БРЮХАНОВ В.В.
Кинетика люминесценции самоупорядоченных квантовых точек CdZnSeS/ZnS вблизи резонансно-возбужденных наночастиц островковой серебряной пленки.....63
МЕТЛИНА Д.А., МЕТЛИН М.Т., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ТАЙДАКОВ И.В.
Зависимость вероятности безызлучательной релаксации электронного возбуждения в пиразолсодержащих 1,3-дикетонатных координационных соединениях неодима(III) от степени фторированности лигандного окружения.....65
ЧЕРПАК П.С., ИВАНОВ Г.Ю., ЛАРИОНОВ И.А., ТЫРТЫШНЫЙ В.А.
Исследование разогрева силоксановых полимеров мощным лазерным излучением, выходящим через боковую поверхность оптического волокна....67
КОЛЯДИН А.Н., КОСОЛАПОВ А.Ф., БУФЕТОВ И.А.
Температура плазмы оптического разряда в полых волоконных световодах при пороговых условиях.....69
РИЗАЕВ Г.Э., МОКРОУСОВА Д.В., САВИНОВ С.А., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., ГРУДЦЫН Я.В., КОРИБУТ А.В., ШИПИЛО Д.Е., ПАНОВ Н.А., МИТЯГИН Ю.А., КОСАРЕВА О.Г., ИОНИН А.А.
Терагерцовое излучение, генерируемое в плазме одноцветного филамента.....71
ЮРЛОВ И.А., РЯБОЧКИНА П.А., ХРУЩАЛИНА С.А., ЕГОРЫШЕВА А.В., ГОЛОДУХИНА С.В.
Особенности взаимодействия лазерного излучения с высокой плотностью мощности с наноразмерными частицами ZrO_2-Y_2O_3 и CaF_2-ErF_3.....73
ЕПИФАНОВ Е.О., ШУБНЫЙ А.Г., МИНАЕВ Н.В.
Лазерно-индуцированное жидкостное травление лейкосапфира при высоких давлениях.....75
МАКИН В.С., МАКИН Р.С., ЛОГАЧЕВА Е.И.
Упорядоченные наноструктуры разрушения при взаимодействии УКИ УФ лазерного излучения с диэлектриками и универсальная поляритонная модель.....77

ШУБНЫЙ А.Г., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., РЫБАЛТОВСКИЙ А.О., ПАРЕНАГО О.П.
Лазерная абляция мишени палладия в среде сверхкритического диоксида углерода с последующим лазерным вплавлением наночастиц в мезопористый порошок Al_2O_3.....79
КАЛИННИКОВ Д.С., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г.
Синтез золотых и серебряных наночастиц методом фемтосекундной лазерной абляции для целей плазмон-усиленной флуоресценции красителей.....81
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В.
Температурная перестройка фазового синхронизма в кристалле $BaGa_2GeSe_6$.....83
АЛОЯН Г.А., КОВАЛЕНКО Н.В., АГАФОНОВ В.М., МУХАНЬКОВ Д.М., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А.
Концепция эквивалентной температуры материалов в условиях неоднородного распределения температуры.....85
ДОЛГАНОВ П.В., БАКЛАНОВА К.Д., ДОЛГАНОВ В.К.
Особенности оптических свойств и плотность фотонных состояний холестерических фотонных кристаллов.....87
ЖЕВАЙКИН К.Е., ФОКИНА М.И., ШИРОКОВА А.С.
Исследование влияния размера кристаллитов органических нелинейно-оптических со-кристаллов аминопиридин-нитрофенол на интенсивность второй оптической гармоники.....89
АВДЕЕВА А.Ю., ВЕТРОВ С.Я., ПЯТНОВ М.В., РУДАКОВА Н.В. ТИМОФЕЕВ И.В.
Хиральные оптические таммовские состояния на границе анизотропного зеркала и холестерика с красителем.....91
РОМАШКИНА А.М., НОВИКОВ В.Б., МУРЗИНА Т.В.
Магнитооптические эффекты и генерация второй гармоники в магнитоплазмонных кристаллах на основе биметаллических плёнок.....93
АНИКЕЕВА В.Е., БОЛДЫРЕВ К.Н., СЕМЁНОВА О.И.
Исследование фазовых переходов в перспективных для фотовольтаики кристаллах $MAPbI_3$.....95
ЗАБОЛОТСКИЙ М.С., КАЦАБА А.В., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г.
Фотодеградация коллоидных нанокристаллов CdS/ZnSe.....97
МЕТЛИН М.Т., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ТАЙДАКОВ И.В., ФЕДЯНИН В.В., ТАНАНАЕВ П.Н.
Источник одиночных инфракрасных фотонов на основе коллоидных нанокристаллов CdSe/CdS/ZnS и комплекса Nd(III) с лигандным окружением из класса 1,3-дикетонов.....99
РАДИОНОВ М.С., ПЕСЧАНСКИЙ А.В., НОВИКОВА Н.Н., ЯКОВЛЕВ В.А., КЛИМИН С.А.
ИК-фононы и спин-фононное взаимодействие в кристалле $LiNiPO_4$.....101

ИСХАКОВА Л.Д., МИЛОВИЧ Ф.О., МАШИНСКИЙ В.М.,. ВЕЛЬМИСКИН В.В., ПЛАСТИНИН Е.А., ВАСИЛЬЕВ А.Л., БОНДАРЕНКО В.И., ПРЕСНЯКОВ М.Ю.
Активированные висмутом преформы, световоды, стёкла: микроструктура, состав, нановключения и Bi-кластеры.....103
КОПЬЕВА М.С., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К.
Оптические свойства композитных сред с металлическими наночастицами различной формы.....105
УМАНСКАЯ С.Ф., КУДРЯВЦЕВА А.Д., ЧЕРНЕГА Н.В., ШЕВЧЕНКО М.А.
Наночастицы рубина: получение и оптические свойства.....107
САПАРИНА С.В., ХАРИНЦЕВ С.С., ФИШМАН А.И., СТОЛОВ А.А.
Исследование углеродных нанокомпозитов методами электро- и термо-ассистируемого гигантского комбинационного рассеяния света.....109
НОВИКОВА Н.Н., ЯКОВЛЕВ В.А., КУЧЕРЕНКО И.В., МУРАТОВ А.В., КАРЧЕВСКИ Г., ШРАЙЭК Ш.
Зависимости частот плазмонов и ИК-фононов от температуры в пленках $Pb_{1-X}Sn_XTe$ на подложках GaAs/CdTe.....111
ЧЕРНЫХ Е.А., ХАРИНЦЕВ С.С.
Ближнеполевой фотоиндуцированный нагрев полимерной пленки.....113
МАЛЫШЕВА И.В., КОЛМЫЧЕК И.А.
Спектроскопия фазы второй гармоники в гиперболических метаматериалах на основе золотых наностержней.....115
ХАНКАЕВ А.А., АРТАМОНОВ Д.А., ЦИБУЛЬНИКОВА А.В., СЛЕЖКИН В.А., САМУСЕВ И.Г., БРЮХАНОВ В.В.
Функции диэлектрической проницаемости титановых наноструктурированных поверхностей.....117
ШИРОКОВА А.В., МАСЛОВ А.В., БАКУНОВ М.И.
Адиабатическая трансформация плазмона на поверхности нестационарного графена.....119
ТРУБАЕВ В.В., МАКИН В.С.
Температурная зависимость возбуждения и распространения прижатой волны.....121
СТЯПШИН В.М., САУШИН А.С., МИХЕЕВ Г.М.
Влияние структуры Ag/Pd нанокомпозитных плёнок на форму импульсов поляризационно-чувствительного фототока.....123
КОРОЛЕВА А.В., МАРТЫШОВ М.Н.
Исследование нанокристаллических оксидов металлов методом ИК-спектроскопии.....125
МАТРОСОВА А.С., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., АСЕЕВ В.А., ДЕМИДОВ В.В., КУЗЬМЕНКО Н.К., АНАНЬЕВ В.А., НИКОНОРОВ Н.В.
Активные волоконные световоды на основе кварцевого стекла и нанокристаллов $YAG:Nd^{3+}$.....127
ЗАРЕЦКАЯ Г.А., ДРОЗДОВСКИЙ А.В., ЧЕПЛАГИН Н.А.
Характеристики передачи интегральных кольцевых резонаторов.....129

НИКОЛАЕВ Н.Э., ПАВЛОВ С.В., ЧЕХЛОВА Т.К.
Особенности дисперсионных характеристик многослойных оптических волноводов.....131
БОГАЧКОВ И.В., АЛЕКСАНДРОВА А.И.
Изучение бриллюэновских рефлектограмм при изгибах оптических волокон.....133
МАМРАШЕВ А.А., МИНАКОВ Ф.А., НИКОЛАЕВ Н.А., КУЗНЕЦОВ С.А., ТАНЫГИНА Д.С.
Высокоэффективные широкополосные терагерцовые поляризаторы на основе одномерных решёток.....135
АКМАЛОВ А.Э., АКСЕНОВ Е.А., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., МАКСИМОВ Е.М., МИТЯГИН Ю.А., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.
Исследование терагерцовых спектров пропускания и отражения микрокристаллов органических соединений.....137
РУСИНОВ А.П., КУЧЕРЕНКО М.Г.
Влияние плазмонных наночастиц на нелинейно-оптические параметры растворов органических красителей.....139
МИНАЕВА Е.Д., ДЕМИНА Т.С., ДУЛЯСОВА А.А., МИНАЕВ Н.В.
Особенности формирования матриксов из новых порошковых материалов методом поверхностно-селективного лазерного спекания.....141
НЕКРАСОВ А.Д., УНТУРА М.М.
Органические фотоэлементы на основе мультихромных нанокристаллов полиметиновых красителей.....143
ВОРОПАЕВ К.О., ЖУМАЕВА И.О., СЕЛЕЗНЕВ Б.И., ИОНОВ А.С.
Просветляющие покрытия на основе тонких диэлектрических пленок для фотодиодов ИК-диапазона 1310 нм.....145
БЛАНК А.В., БОГДАНОВ С.Д.
Имитационные модели фотовольтатических массивов с различной симметрией.....147
ЯКУШЕНКОВ П.О.
Проект фотонного АЦП.....149
ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А., ЧУВАКОВА М.А., КОЛКЕР Д.Б., БОЙКО А.А., ПАВЕЛЬЕВ В.С.
Сегнетоэлектрические кристаллы с прецизионной доменной структурой для нелинейно-оптических преобразований и управления когерентным излучением.....151
ТОЛСТИК А.Л., ДАДЕНКОВ И.Г., МИКСЮК Ю.И., САЕЧНИКОВ К.А.
Мультиплексная запись динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов.....153
САЗОНОВ С.В.
Дифракционный предел в теории световых пуль.....155
МАЙМИСТОВ А.И., ЛЯШКО Е.И., ЕЛЮТИН С.О.
Спиновый и угловой моменты нелинейной волны на поверхности топологического изолятора.....157

КОЛМЫЧЕК И.А., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., МУРЗИНА Т.В.
Генерация оптической второй гармоники в наноструктурах с неоднородным распределением намагниченности.....159
БУРОВА Е.А., БОДРОВ С.Б., СЕРГЕЕВ Ю.А., КОРЫТИН А.И., СТЕПАНОВ А.Н.
Индуцированная терагерцовыми импульсами генерация второй гармоники фемтосекундного оптического излучения в изотропных средах.....161
ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ЛЕКСИН А.Ю., ПРОХОРОВ А.В., ВОЛКОВ В.С.
Когерентные оптические эффекты в гибридных оптоплазмонных схемах на основе графена и полупроводниковых квантовых точек.....163
ДЗЕДОЛИК И.В., ПЕРЕСКОКОВ В.С.
Возбуждение мод геликоидальной наноантенны поверхностными плазмон-поляритонами.....165
ПЕТРОВ Н.И., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В., УСИЕВИЧ Б.А.
Усиление эффекта Гуса-Хенкен при плазмонном резонансе в субволновых дифракционных решетках.....167
НОВИКОВ В.Б., МУРЗИНА Т.В.
Гибридный метод конечных разностей в частотной области для расчета дифракции излучения в планарных фотонных кристаллах.....169
ПРОХОРОВА У.В., ЕФРЕМОВА Е.А., КРЫЛОВ И.Р.
Влияние угла поворота на рассеяние на золотых наноантеннах.....171
КАЗАНЦЕВА Е.В.
Векторный π-импульс в оптическом усилителе с резонансными атомами.....173
БАЙРАМДУРДЫЕВ Д.Я., МАЛИКОВ Р.Ф., РЫЖОВ И.В., МАЛЫШЕВ В.А.
Оптическая динамика монослоя квантовых излучателей V типа.....175
АКИМОВ А.А., ГУЗАИРОВ С.А., ИВАХНИК В.В.
Четырёхволновое взаимодействие на тепловой нелинейности в схеме с обратной связью при больших коэффициентах отражения.....177
ИВАХНИК В.В., САВЕЛЬЕВ М.В.
Влияние массы наночастиц в прозрачной жидкости на точность обращения волнового фронта четырёхволновым преобразователем излучения.....179
МИНАЕВА Е.Д., МИНАЕВА С.А., МИНАЕВ Н.В.
Лазерные аддитивные технологии формирования функциональных тканеинженерных конструкций для восстановления костной ткани.....181
МИНАЕВ В.П., БОГАЧЕВ В.Ю., КАПЕРИЗ К.А., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.
Исследование теплопереноса в воде при лазерном нагреве.....183
ИСМАИЛОВ Ш.М., КАМЕНЕВ В.Г., АРАПОВ Ю.Д.
Регистрация параметров дисперсной среды на основе анализа характеристик рассеянного и прошедшего лазерного излучения.....185
ЛЕБЕДЕВ В.Ф., БУЛЫГА Д.В., КОЛЯДИН А.В.
Исследование примесного состава многосекторальных пластин синтетических НРНТ алмазов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.....187

ЗАРУБИН В.П., ЖИГАРЬКОВ В.С., ЮСУПОВ В.И.
Комплексное исследование выживаемости биологических организмов при лазерной печати гелевых микрокапель.....189
ХОМИЧ Ю.В., МАЛИНСКИЙ Т.В., МИКОЛУЦКИЙ С.И., РОГАЛИН В.Е., ЯМЩИКОВ В.А., КАПЛУНОВ И0.А., ИВАНОВА А.И.
Воздействие мощного ультрафиолетового импульса на полированную бескислородную медь.....191
АКМАЛОВ А.Э., ЧИСТЯКОВ А.А., КОСТАРЕВ В.А., КОТКОВСКИЙ Г.Е.
Детектирование взрывчатых веществ методом спектрометрии приращения ионной подвижности с лазерной ионизацией.....193
МАШКО А.М., МЕЙСТЕРСОН А.А., АФАНАСЬЕВ А.Е., БАЛЫКИН В.И.
Импульсная дипольная ловушка фемтосекундной длительности.....195
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., ЛАМПИН Ж.-Ф., МИТЯГИН Ю.А., САВИНОВ С.А., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В., ЧЕБОТАРЕВ И.А.
Временная структура терагерцового излучения NH_3 лазера при оптической накачке «длинными» импульсами CO_2 лазера.....197
КОПЬЕВА М.С., ФИЛАТОВА С.А., КАМЫНИН В.А., ЧЕХЛОВА Т.К., ЦВЕТКОВ В.Б.
Импульсный волоконный гольмиевый лазер с внутрирезонаторным интерферометром Маха-Цандера.....199
ШУЛЬГА А.В., ХОМЧЕНКО А.В., ШИЛОВА И.В.
Возбуждение мод шепчущей галереи призмой связи во внешнем резонаторе лазерного диода.....201
МИЛИКОВ Э.А., СЕМЕНОВ В.Г., БРОСЛАВЕЦ Ю.Ю., ФОМИЧЕВ А.А.
Оптические схемы регистрации сигналов в четырёхчастотном лазерном гироскопе.....203
УСТИНОВ А.Б., КОНДРАШОВ А.В., НИКИТИН А.А., ЛЕБЕДЕВ В.В., ПЕТРОВ А.Н., ШАМРАЙ А.В., КАЛИНИКОС Б.А.
Малошумящий перестраиваемый оптоэлектронный СВЧ-генератор с фильтром на спиновых волнах.....205
МЕЩЕРОВА Д.Н.
О принципиальных преимуществах радиофотонных технологий.....207
ФРОЛОВЦЕВ Д.Н., МАГНИЦКИЙ С.А., БОРМАШОВ В.С., ДЁМИН А.В.
Измерение квантовых поляризационных состояний бифотонных источников.....209
БАЛАКИРЕВА И.В., БЛИНОВ И.Ю., ХАТЫРЕВ Н.П.
Каскадирование эффекта Бриллюэна в волоконно-оптическом лазере.....211
ЗОТОВ А.М., КОРОЛЕНКО П.В., ЦИЦИЛАШВИЛИ Г.И.
Информационные лазерные системы на вихревых пучках.....213
БОЛЬБАСОВА Л.А., ГРИЦУТА А.Н., ЛУКИН В.П.
Датчик волнового фронта Шэка-Гартмана для работы в широком диапазоне изменения характеристик атмосферной турбулентности.....215

УС Н.А., АВЕРШИН А.А.
Повышение добротности оптического контура кольцевого моноблочного гироскопа.....217
ЮШКОВ К.Б., ЗАРУБИН В.П., МАНЦЕВИЧ С.Н., МОЛЧАНОВ В.Я.
Разработка акустооптических дисперсионных линий задержки высокого разрешения.....219
КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В.
Акустооптический фильтр пространственных частот с малым потреблением акустической мощности.....221
БОРИТКО С.В., БОРИТКО Я.С.
Использование комбинационного рассеяния для диагностики драгоценных камней в сложных ювелирных изделиях.....223
БЫКОВСКИЙ А.Ю.
Структура протоколов квантовой сети.....225
ПАВЛОВ А.В.
Моделирование квантово-подобных когнитивных феноменов методом голографии Фурье: дилемма заключенного.....227
ШИПКО В.В.
Модель представления гиперспектральных данных в виде многомерных локально однородных и изотропных случайных полей.....229
КОРОЛЕНКО П.В., РУЖИЦКАЯ Д.Д., РЫЖИКОВ С.Б., РЫЖИКОВА Ю.В.
Особенности спектрального анализа фракталоподобных систем.....231
БЛАНК А.В., НАСОНОВ А.А.
Дифференциальный анализ непараксиальных векторных волновых пучков.....233
БАЛБЕКИН Н.С., КУЛЯ М.С., СОКОЛЕНКО Б.В., ГОРОДЕЦКИЙ А.А., ПЕТРОВ Н.В.
Дифракционная эволюция сверхширокополосных равно топологически заряженных ТГц пучков для беспроводной передачи информации.....235
БАЛАН Н.Н., ИВАНОВ В.В., КУЗОВКОВ А.В., ХАРЧЕНКО Е.Л.
Расчет форм осветителя для литографических процессов технологии уровня 65 нм.....237
ШИШОВА М.В., ОДИНОКОВ С.Б., ЖЕРДЕВ А.Ю., КОВАЛЕВ М.С., ЛУШНИКОВ Д.С.
Корректировка фазового дисбаланса в оптической системе интерференционного датчика линейных перемещений.....239
КОМОЦКИЙ В.А., СУЕТИН Н.В., МЕШАЛКИН А.В.
Макет сейсмометра с применением датчика на основе глубокой отражающей фазовой дифракционной решетки.....241
ДЕНИСОВ Д.Г., ПРОСОВСКИЙ Ю.О.
Оценка качества технологии нанесения покрытия на подложки с различным уровнем шероховатости на основе анализа индикатрисы рассеянного излучения.....243

ПУТИЛИН А.Н., МОРОЗОВ А.В., ДРУЖИН В.В., КОПЁНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П., МАЛИНИНА П.И., ДУБЫНИН С.Е., ПЕРЕВОЗНИКОВА А.С., ЛЬВОВА К.И.
Голографическая оптика для дисплеев дополненной реальности (HUD и HMD).....245
КАЙТУКОВ Ч.Б., КИСЕЛЕВ В.А., ЯНОВСКИЙ А.В.
Безлинзовая запись радужной голограммы с использованием преобразования Фурье.....247
ПАВЛОВ П.В., ВОЛЬФ И.Э., КУСКОВ И.Э., СТЕПАНОВ А.Р.
Неразрушающий контроль остекления кабин самолетов по анализу параметров спекл-фотографии.....250
ЧЕРЁМХИН П.А., КОЗЛОВ А.В.
Оценка шумовых характеристик цифровых камер автоматической сегментацией однородных сцен.....252
ТУРОВ А.Т., КУЛЯ М.С., ГОРОДЕЦКИЙ А.А., ПЕТРОВ Н.В.
Оценка качества восстановления импульсных голограмм в терагерцовом диапазоне частот.....254
КРАСНОВ В.В., РЯБЦЕВ И.П.
Безлинзовая схема оптического кодирования изображений со светодиодным освещением.....256
ПРОКОПОВА Д.В., ЕФИМОВА К.В., КИШКИН С.А., КОТОВА С.П., САМАГИН С.А.
Формирование спиральных пучков света голографическим методом.....258
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ЖУМАЛИЕВ К.М., АЛЫМКУЛОВ С.А.
Запись голограмм фазовых сред, учитывающая наличие второй опорной волны.....260
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., ГОРБЕНКО Д.А., АВДОНКИНА Н.А., БАЛДУЕВА И.А., ДАНИЛОВА А.Б., ГЕЛЬФОНД М.Л., НЕХАЕВА Т.Л., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Применение цифровой голографической микроскопии для оценки восприимчивости к фотодинамическому воздействию различных клеточных культур.....262
ИВАНОВ П.А.
Квадратичные корреляционные фильтры в задачах различения изображений.....264
САВИЧ Д.Е., ПОПОВА А.В., КРИВОШЕЕВ И.А., КРИШТОП В.В.
Поляризационная индикатриса как метод исследования состояния поляризации излучения.....266
ГАППАРОВА М.Н., ЩУКИН А.В., БОДРЕНИН В.Е., РОМАНЕНКО Д.К., ПЕРИН А.С.
Исследование влияния изменения температуры на ширину лазерного пучка при формировании пироэлектрических пространственных солитонов в кристалле ниобата лития.....268

КОСТРИЦКИЙ С.М., ЯЦЕНКО А.В., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А.
Влияние межэлектродной ёмкости на пироэлектрический отклик интегрально-оптических модуляторов на X-срезе $LiNbO_3$.....270
АСТАФУРОВ Р.А., ГАЛУЦКИЙ В.В., ИВАШКО С.С., ШАПОВАЛОВ А.В.
Поглощение ниобата лития и ниобата калия в ТГц диапазоне.....272
ПЕРИН А.С., ОКУНЕВ Д.В.
Взаимодействие светлых пространственных солитонов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта.....274
ТЕПЛЯКОВА Н.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Фотоэлектрические поля номинально чистых кристаллов $LiNbO_3$ различного генезиса.....276
РОМАНЕНКО Д.К., СОКОЛЬНИКОВ А.В., ГАППАРОВА М.Н., КАРАНКЕВИЧ О.А., ПЕРИН А.С.
Температурная зависимость компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в кристалле ниобата лития.....278
АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф., АНИКЬЕВА Э.Н.
Проявление акустической плотности состояний в спектрах квазиупругого рассеяния света кристаллов ниобата лития.....280
СИДОРОВ Н.В., ТИТОВ Р.А., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Влияние бора на структурную однородность и оптические свойства монокристаллов ниобата лития.....282
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Коноскопический контроль оптической однородности кристаллов ниобата лития, легированных бором.....284
СТРОГАНОВА Е.В., ГАЛУЦКИЙ В.В., НАЛБАНТОВ Н.Н., ПОНЕТАЕВА И.Г.
Исследование состава рассеивающих дефектов в кристаллах $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn).....286
СТАРОДУБ О.Р., ВОСКРЕСЕНСКИЙ В.М., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.
Компьютерное моделирование кластерной структуры кислородно-октаэдрического кристалла ниобата лития.....288
КИНЯЕВСКИЙ И.О., ДАНИЛОВ П.А., СМИРНОВ Н.А., КУДРЯШОВ С.И., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., ИОНИН А.А., ДУНАЕВА Е.Э.
Филаментация 515-нм 300-фс лазерных импульсов в кристалле $BaWO_4$.....290
ГУЦЕНКО Д.Д., БОЛДЫРЕВ К.Н.
Исследование центров окраски в монокристаллах карбида кремния посредством люминесцентной спектроскопии высокого разрешения.....292
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И., МОЛЧАНОВ С.В.
Измерение удельного электросопротивления кристаллов германия методом тепловизионной дефектоскопии.....294
ЕРМАКОВ А.С., ЛЯПИН А.А., ШАВЕЛЬЕВ А.А., ГУЩИН С.В., РЯБОЧКИНА П.А., СЕМАШКО В.В.
Апконверсионная люминесценция фторидных кристаллов со структурой шеелита, легированных ионами Er^{3+}.....296

МАКАРЕВИЧ А.В., ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., НАВНЫКО В.Н., АМАНОВА М.А., ШАНДАРОВ С.М.
Теоретическая оптимизация выходных характеристик смешанных голограмм в фоторефрактивном кристалле $Bi_{12}TiO_{20}$ произвольного среза.....298
МОЛЧАНОВА А.Д., БОЛДЫРЕВ К.Н.
Исследование спектров оптического поглощения ионов Co^{2+} в ортоборате кобальта $Co_3(BO_3)_2$.....300
КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М., ТОЛСТИК А.Л., АГИШЕВ И.Н., ДАДЕНКОВ И.Г., КАРГИН Ю.Ф.
Динамика оптического поглощения в кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$, индуцированного когерентным импульсным излучением с различными длинами волн.....302
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ВАЙСБУРГ Н.Я.
Оптические аномалии в элементах из парателлурита при эксплуатации устройств на их основе.....304
КЛИМИН С.А., ЧУ М., ПОПОВА М.Н.
Инфракрасные мультиплеты и тонкая структура линий иона Pr^{3+} в легированном кристалле YPO_4.....306
НЕКРАСОВ А.Д., КРИВОБОК В.С., УНТУРА М.М.
Люминесцирующие нанокристаллы металлокомплексов анионных цианиновых красителей.....308
СТРОКОВА Ю.А., КАРПОВ В.Б., САЛЕЦКИЙ А.М.
Модифицированные спектральные свойства органических красителей в одномерных полимерных фотонных кристаллах.....310
КЛИМИН С.А., КУЗНЕЦОВА Е.С., БЕРДОНОСОВ П.С.
Магнитное упорядочение $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$: спектроскопия крамерсовских дублетов.....312
ГРИЩЕНКО И.В., СТИРМАНОВ Ю.С., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А.
Исследование разогрева кристалла трибората лития при воздействии интенсивного лазерного излучения на длине волны 1070 нм.....314
БУДАГОВСКИЙ И.А., ЗОЛОТЬКО А.С., КУЗНЕЦОВ А.А., СМАЕВ М.П., ШВЕЦОВ С.А., БОБРОВСКИЙ А.Ю., БОЙКО Н.И., ШИБАЕВ В.П.
Обратимая запись светоиндуцированной деформации директора в нематическом жидкокристаллическом полимере с мезогенными боковыми фрагментами, легированном красителем.....316
КНЯЗЬКОВ А.В.
Оценка двулучепреломления напряженных материалов по отражению двух ортогонально поляризованных лучей света.....318
АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф., АНИКЬЕВА Э.Н.
Рассеяние света на поляритонах в сегнетоэлектриках с дефектами стехиометрии.....320
ГОРЕЛИК В.С., ПЯТЫШЕВ А.Ю.
Комбинационная опалесценция в области фазового перехода в сегнетоэлектрических кристаллах.....322

МАМОНОВ Е.А., РАСПУТНЫЙ А.В., КОПЫЛОВ Д.А., МУРЗИНА Т.В.
Исследование генерации второй гармоники в одномерных микрорезонаторах от излучения вынужденного параметрического рассеяния.....324
КОВАЛЕНКО Н.В., АЛОЯН Г.А., МУХАНЬКОВ Д.М., КАРПОВА Т.К., СМИРНОВ А.В., РЯБУШКИН О.А.
Измерение оптических свойств рассеивающих сред на основе гониометрического метода с использованием интегрирующих сфер и математического моделирования Монте-Карло.....326
ЧЕРНОВ М.В., ЛЯПИН А.А., КУЗЬМИН А.М.
Люминесцентные экраны для наблюдения инфракрасных лазерных пучков большого диаметра.....328
ШОСТКА В.И., ШОСТКА Н.В., ВЕРШИЦКИЙ В.И.
Сравнительный анализ клатратных структур в приповерхностных слоях водных растворов.....330
ИСМАГИЛОВ А.О., ГЕНДРИНА А.А., ПОНОМАРЕВА Е.А., ПУТИЛИН С.Э., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А.
Генерация терагерцовых волн при двухимпульсном лазерном возбуждении струи этанола.....332
МИРОНОВ П.П., ЛАПИН В.А., ЩУКАРЕВ И.А.
Генерация ультракоротких лазерных импульсов в условиях синхронизированного взаимодействия квазинепрерывного волнового пакета с бегущей волной показателя преломления.....334
ИСМАГИЛОВ А.О., ПОНОМАРЕВА Е.А., ПУТИЛИН С.Э., ЦЫПКИН А.Н.
Влияния температуры жидкости на эффективность генерации терагерцового излучения при лазерной филаментации в плоской струе воды.....336
АЛИЕВА С.С., АЛЕКСЕЕВ К.Н.
Распространение фундаментальных мод в петлевом резонаторе ввода-вывода.....338
ПАРПУЛОВА К.В., МЕЛЬНИК М.В., ЦЫПКИН А.Н.
Моделирование передачи фемтосекудных оптических гребенок в среде с нормальной дисперсией.....340
БАРШАК Е.В., АЛЕКСЕЕВ К.Н., ВИКУЛИН Д.В., ЛАПИН Б.П., ЯВОРСКИЙ М.А.
CNOT-гейт в мультигеликоидальных оптических волокнах.....342
ЩУКАРЕВ И.А., КОРОБКО Д.А., САЛГАНСКИЙ М.Ю., ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., МИРОНОВ П.П.
Генерация параболических лазерных импульсов в коротких волоконных усилителях.....344
БОГДАНОВА Е.В., ГРАЧЁВ Н.А., ЩЕРБАКОВА В.А., СУШКО Д.Н., ПЕТУХОВА А.Ю.
Исследование чувствительности оптоволоконного датчика в широком диапазоне температур.....346
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И.
Модуляционная неустойчивость волновых пакетов, распространяющихся в световоде с дисперсией каскадно зависящей от длины.....348

ОПАРИН Е.Н., ЖУКОВА М.О., ЦЫПКИН А.Н.
Экспериментальное исследование зависимости длительности чирпированных терагерцовых импульсов от параметров металлического волновода.....350
ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А.
Разработка одномодовых разветвителей оптического излучения интерференционного типа на основе градиентных волноводов в стекле.....352
ГУЩИН С.В., ЛЯПИН А.А., ЧЕРНОВ М.В., ЕРМАКОВ А.С., КУЗНЕЦОВ С.В., РЯБОЧКИНА П.А., ПРОЙДАКОВА В.Ю., ФЕДОРОВ П.П.
Фторидные люминофоры SrF_2:RE (RE = Er, Tm, Ho, Yb) для преобразования инфракрасного излучения.....354
СОСНОВА Н.С., ПАРФЕНОВ В.А.
Применение рентген-флуоресцентной спектроскопии для исследования произведений темперной живописи.....356
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Телевизионная система для подводного видения в замутненной среде.....357
ГРИГОРЬЕВА А.Н., ПАРФЕНОВ В.А., ЩЕГЛОВА Н.Л.
Использование компьютерных методов обработки цифровых оптических изображений для атрибуции произведений живописи.....359
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А.
Стереоскопическая двухдиапазонная телевизионная система визуализации изображения.....360
ЕФРЕМЦЕВ В.Г., ЕФРЕМЦЕВ Н.Г., ТЕТЕРИН Е.П., ТЕТЕРИН П.Е., ГАНСОВСКИЙ В.В., ШНУРОВ А.С., РОДИН Д.А.
Оценка качества фотографий на основе методов глубокого обучения нейронных сетей.....362
ЮРИНА У.В., СИДОРОВ А.И., ПОДСВИРОВ О.А.
Электронно-лучевые технологии для изготовления оптических микро- и наноэлементов на поверхности стекол и кристаллов.....364
САНИНА В.А., КУДАЕВ О.С., СИДОРОВ А.И.
Идеальные поглотители на основе металлических и полупроводниковых наночастиц в стеклах для солнечной энергетики.....366
КИРПИЧЕНКО Д.А., СИДОРОВ А.И., ПОДСВИРОВ О.А.
Влияние электронного облучения на оптические и структурные свойства кварцевого стекла.....368
ОРЕШКИНА К.В., ДУБРОВИН В.Д., НИКОНОРОВ Н.В., СГИБНЕВ Е.М.
Борогерманатные стекла с нанокристаллами перовскитов.....370
БАБКИНА А.Н., ЕГОРОВА Я.Б., ЗЫРЯНОВА К.С.
Исследование спектральных свойств смешанных нанокристаллов CuCl – CuBr в боратном стекле.....372
КУЗЬМЕНКО Н.К., АСЕЕВ В.А., ФЁДОРОВ Ю.К.
Исследование спектрально-люминесцентных свойств ионов эрбия в щелочногерманатных стеклах для оптических температурных датчиков.....374

БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С., КУЛЬПИНА Е.В., НУРЫЕВ Р.К.
Исследование влияния условий термообработки на люминесцентные свойства хромсодержащей боратной стеклокерамики.....376
ШЕСТОПАЛОВА Ю.А., ДУБРОВИН В.Д.
Исследование спектрально-люминесцентных свойств фототерморефрактивных стекол с добавлением лития.....378
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П., ШАЙТАНОВ Д.В., КЛЕВЦОВ О.В.
Кинетика свечения барьерного разряда в процессе преобразования анодированного Al_2O_3.....380
ШМАГИНА Е.Г., КОНШИНА Е.А., ЩЕРБИНИН Д.П., ХАВЛЮК П.Д.
Усиление фотолюминесценции углеродных точек в гибридных структурах на основе гранулированных серебряных пленок.....382
ДАВЫДОВ В.Н., ЗАДОРОЖНЫЙ О.Ф.
Время излучательной рекомбинации с учетом разбаланса концентраций носителей заряда.....384
АЛИХАЙДАРОВА Э.Ж., КУАНЫШБЕКОВ М.Е., АФАНАСЬЕВ Д.А.
Влияние наноструктур Ag-SiO_2 на кинетику флуоресценции пленок полупроводникового полимера поли[3-гексилтиофена].....386
БУХАРОВ Д.Н., КУЧЕРИК А.О., АРАКЕЛЯН С.М.
Моделирование оптических свойств фрактальной островковой металлической пленки.....388
КОЛЧИН А.В., ШУЛЕЙКО Д.В., ПРЕСНОВ Д.Е., КОЗЮХИН С.А., ЛАЗАРЕНКО П.И.
Формирование периодических поверхностных структур и фазовые изменения в аморфных тонких пленках $Ge_2Sb_2Te_5$, отожженных фемтосекундными лазерными импульсами.....390
ДЕВИЦКИЙ О.В., КАСЬЯНОВ И.В., НИКУЛИН Д.А.
Влияния термического отжига на оптические свойства тонких пленок AlN на сапфире.....392
ДЕВИЦКИЙ О.В., НИКУЛИН Д.А., СЫСОЕВ И.А.
Оптические свойства тонких пленок AlN на сапфире, полученных методом ионно-лучевого осаждения.....394
ВАРЛАМОВ П.В., СЕРГЕЕВ М.М., АНДРЕЕВА Я.М., ИТИНА Т.Е.
Моделирование оптических характеристик композитных плёнок TiO_2 с неоднородным по размеру ансамблем наночастиц серебра.....396
ДЖАНАБЕКОВА Р.Х., МЕНЬШОВА Е.П., ИБРАЕВ Н.Х.
Композит оксид графена – наночастицы серебра для гигантского комбинационного рассеяния света.....398
КУЗНЕЦОВ Л.Г., СВЯХОВСКИЙ С.Е.
Методы создания наноматериалов на основе углерода при помощи лазерного восстановления оксида графена.....400
ПЕРЕВОЩИКОВ Д.А., КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А.
Структура нижней зоны проводимости SnTe.....401

ИБРАЕВ Н.Х., АФАНАСЬЕВ Д.А.
Изучение процесса разделения носителей заряда на границе раздела перовскит–оксидный полупроводник.....403
ДАВЫДОВ В.Н., ЗАДОРОЖНЫЙ О.Ф.
Ограничение числа уровней размерного квантования в квантовых ямах прямоугольных формы.....405
ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., РЫБАЛТОВСКИЙ А.О.
Синтез биметаллических наночастиц Au/Ag методом лазерной абляции в среде сверхкритического диоксида углерода.....407
ГЕРАСИМОВ В.С., БИКБАЕВ Р.Г., ЕРШОВ А.Е.
Гибридизация аномалий Рэлея с локальными модами различных порядков в решетках алюминиевых наночастиц.....409
АЛИЕВ С.А., РАВИН А.Р., ПАХЛАВОНОВА К.Д., ЧЕХЛОВА Т.К., ВОЛКОВ Г.В.
Разработка программного обеспечения для анализа результатов исследования трёхслойной тонкопленочной структуры.....411
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МИХАЙЛОВ Н.Н., СИДОРОВ Г.Ю.
Сигнальные и темновые свойства инфракрасных барьерных детекторов на основе теллурида кадмия ртути.....413
ЕФИМОВА У.А., КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А.
Исследование взаимодействия лазерного излучения с краской ПФ-115, нанесенной на поверхность металла.....415
БОЙЧЕНКО А.П., ШАЙТАНОВ Д.В., КЛЕВЦОВ О.В., ЯКОВЕНКО Н.А.
Формирование нанопористой структуры металла при его обработке в барьерном разряде.....417
МАКИН В.С., ТРУБАЕВ В.В., МАКИН Р.С.
Механизм деградации многослойных диэлектрических покрытий под действием поляризованного УКИ излучения.....419
МЫСЛИЦКАЯ Н.А., ЦИБУЛЬНИКОВА А.В., АГАФОНОВА П.Л., ЗУБАВИЧЮС Р.В., ЛЯТУН И.И.
Влияние режима анодирования на оптические свойства модифицированных поверхностей титана.....421
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М., КОПЫЛОВА Т.Н., ДЕГТЯРЕНКО К.М.
Импеданс органических светодиодных структур с термоактивированной замедленной флуоресценцией.....423
АВЕРИН С.В., КУЗНЕЦОВ П.И., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М.
Узкополосный МПМ-детектор видимой части спектра на основе гетероструктуры ZnCdSe/ZnSSe/GaAs.....425
ГОРЯЕВ М.А., КАСТРО Р.А., КОНОНОВ А.А., АНИСИМОВА Н.И., КОЛОБОВ А.В.
Фотоэлектрические свойства структур $Ge_2Sb_2Te_5$/Si.....427
ТЕМИРБАЕВА Д.А., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИБРАЕВ Н.Х.
Плазмон-ускоренный ферстеровский перенос энергии в твердых пленках....429

ГАЗИЗОВ А.Р., САЛАХОВ М.Х., ХАРИНЦЕВ С.С.
Вынужденное гигантское комбинационное рассеяние света на одиночной молекуле, связанной с плазмонным нанорезонатором.....431
БИКБАЕВ Р.Г., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В.
Исследование эффектов гибридизации таммовских плазмон-поляритонов с модами двумерных наноструктурированных сред.....433
БИКБАЕВ Р.Г., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В.
Гибридные состояния таммовских и поверхностных плазмон-поляритонов в резонансной фотонно-кристаллической структуре.....435
БИКБАЕВ Р.Г., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В., ШАБАНОВ В.Ф.
Таммовские плазмон-поляритоны, увеличивающие поглощение в органических солнечных элементах.....437
КОН И.И., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г.
Математическое моделирование плазмонных электромагнитных возмущений вблизи поверхности наночастиц золота и серебра методом FDTD.....439
ГОРБАТОВА А.В., ХУСЯИНОВ Д.И., БУРЯКОВ А.М., ПОНОМАРЕВ Д.С., МИШИНА Е.Д.
Фотопроводящие антенны на основе сверхрёшетки $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$ для систем терагерцевой спектроскопии.....441
ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г.
Эффект Фарадея в средах с магнитоплазмонными включениями.....443
КАСТРО Р.А., ПОПОВА И.О., СМИРНОВА Л.М., ШАДРИН Е.Б.
Магнитооптические и релаксационные явления в монокристаллах прустита.....445
ПЕНЬКОВ С.А., АЛИМБЕКОВ И.Р., НЕЯСОВ П.П., КУЧЕРЕНКО М.Г.
Экситонные и молекулярные спектры флуоресценции антрацена в пористых адсорбентах, коллоидных и гомогенных растворах.....447
ГРИШУНИН К.А., ОВЧАРЕНКО С.В., БИЛЫК В.Р.
Терагерц-индуцированная генерация второй оптической гармоники в кристалле титаната стронция.....449
ОВЧАРЕНКО С.В., ГРИШУНИН К.А., БИЛЫК В.Р.
Динамика нелинейно-оптического отклика в потенциальном сегнетоэлектрике $SrTiO_3$, индуцированная терагерцовым импульсом.....451
СИДОРОВ А.И., ВАКУЛА Н.В., СИВАК А.И.
Линейная поляризуемость металлических наночастиц в телекоммуникационном диапазоне длин волн.....453
ВАСИНА М.В., ХУСЯИНОВ Д.И., ГОРБАТОВА А.В., БУРЯКОВ А.М.
Влияние угла поворота плоскости поляризации оптической накачки на генерацию ТГц излучения в слоистом WSe_2.....455
КОЧУРОВА Д.Н., АЛЕКСЕЕВ Н.И., КАЛУГИН А.И.
Функция распределения отражательной способности распределённых объектов.....457
БАРЫШНИКОВА С.Ю., КАРПИКОВ Б.Н., КАЛУГИН А.И., ЗАРИПОВ М.Р.
Измерение эффективной площади отражения сложных объектов.....459

ПЛЕШАНОВ И.М., ЛИСЕНКОВА А.Е., ЦЕПИЧ В.П., СИДОРОВ А.И.
Моделирование оптической системы для применения в позиционно-чувствительном датчике искры.....461
САМВЕЛОВ А.В., ЯСЕВ С.Г., МОСКАЛЕНКО А.С., БАРАНОВ А.Ю., ПАХОМОВ О.В.
Микрокриогенная система Стирлинга для охлаждения фотоприемного модуля с редкоземельным регенератором и магнитокалорической ступенью охлаждения.....463
БАБКИН О.Э., БАБКИНА Л.А., АЙКАШЕВА О.С., ИЛЬИНА В.В.
Технология ультрафиолетового отверждения для производства оптических кабелей.....465
МАНДУР М.М., АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А.
Фотоэлектрический преобразователь на основе двухкамерной фотоплазменной ячейки: 2D-симуляция.....467
СЕМЕНОВА Л.Е.
Гиперкомбинационное рассеяние света при двухфотонном возбуждении вблизи резонанса с нижним экситонным уровнем в кристалле CdS.....469
МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В.
Ступенчатое возбуждение электронным ударом уровней 5p атома криптона.....471
НАЛБАНДЯН В.М., КУЧЕРЕНКО М.Г.
Влияние плазмонных наночастиц на радиационные и безызлучательные процессы в молекулах.....473
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В., СУХОРУКОВА О.Б.
Тормозное излучение при резонансном комптоновском рассеянии фотона атомным ионом.....475
АСТАШКЕВИЧ С.А.
Изучение влияния связанности электронных состояний на теоретико-информационные свойства молекулы.....477
ЕРМАКОВ Л.К.
Распределение плотности электронных состояний по энергии в P_4 - Se_3.....479
АЛЕКСЕЕВ Е.Е., КАЗАНЦЕВ С.Ю.
Применение метода конечных элементов для расчета лазерных характеристик кристаллов $ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+})$ с немонотонным профилем легирования.....481
КОЖЕВНИКОВ В.А., ПРИВАЛОВ В.Е.
Геометрия сечения активного элемента He-Ne лазера и мощность его излучения.....483
КАЗАНЦЕВ С.Ю., КИСЕЛЕВ В.В., МАРЧЕНКО В.М.
Особенности спектров термического излучения $Ti^{3+}:Al_2O_3$ при лазерном нагреве.....485
АСТАШКЕВИЧ С.А., БОРОВЫХ С.В., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В.
Динамика фотоионизации H_2 под действием интенсивного ультракороткого рентгеновского излучения.....487

БАЗЗАЛ Х., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П., ПАТАПОВИЧ М.П.
Исследование влияния межимпульсного интервала на процессы образования AlO при воздействии на алюминиевую мишень сдвоенными лазерными импульсами.....489
ГУСЕЙН-ЗАДЕ Н.Г., ЖЛУКТОВА И.В., КАЗАНЦЕВ С.Ю., КАМЫНИН В.А., ПОДЛЕСНЫХ С.В., РОГАЛИН В.Е., ТРИКШЕВ А.И., ФИЛАТОВА С.А., ЦВЕТКОВ В.Б.
Пространственно-временная эволюция электронно-дырочной плазмы, формируемой в лазерных полупроводниковых плазменных антеннах.....491
РЫМКЕВИЧ В.С., СЕРГЕЕВ М.М.
Динамика формирования рельефа с наноразмерной глубиной на поверхности плавленого кварца лазерно-индуцированной микроплазмой.....493
МЕЛЕХОВ А.П., ВОВЧЕНКО Е.Д., КОМАРЕЦКИЙ В.В., РАМАКОТИ Р.Ш., ДОМАНИНА И.В.
Наблюдение высокочастотных осцилляций яркости свечения плазмы лазерно-инициируемой вакуумной искры.....495
КОЖЕВНИКОВ В.А., ПРИВАЛОВ В.Е., ФОТИАДИ А.Э.
Положительный столб разряда в лазерных трубках плавно изменяющегося диаметра.....497
ХОМИЧ Ю.В., МАЛИНСКИЙ Т.В., МИКОЛУЦКИЙ С.И., РОГАЛИН В.Е., ЯМЩИКОВ В.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И.
Воздействие мощного ультрафиолетового импульса на карбид вольфрама (WC-3 % Co) 499
ГАВРИШ С.В., ЛОГИНОВ В.В., ПУГАЧЕВ Д.Ю., ПУЧНИНА С.В.
Влияние УФ-излучения плазмы на наведенное оптическое поглощение сапфировых оболочек импульсных газоразрядных ламп.....501
СРЕДИН В.Г., ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., АНАНЬИН О.Б., МЕЛЕХОВ А.П., РАМАКОТИ Р.Ш., ЮРЧАК В.А.
Микроскопический механизм формирования поверхностных дефектов в $Cd_xHg_{1-x}Te$ мягким рентгеновским излучением.....503
СИДОРОВ А.И., БУХАРИНА А.Б., ПЕНТО А.В., АБЛИЗЕН Р.С., НИКИФОРОВ С.М., КРАВЕЦ К.Ю.
Сравнение эффективности ионизации излучением лазерной плазмы и химической ионизации в масс-спектрометрии органических соединений.....505
МАСЛОВА Г.Т., ЗАЖОГИН А.П., МАВРИЧЕВ А.С., ДЕРЖАВЕЦ Л.А., ТРУБЕЦКАЯ А.С., ТИТОВА А.В.
Применение лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии высохших капель плазмы крови в диагностике опухолей мозга (астроцитома).....507
ПРОКОПЕНКО Т.А., НЕЧИПУРЕНКО Н.И., ПАШКОВСКАЯ И.Д., ЗАЖОГИН А.П., ПАТАПОВИЧ М.П.
Применение лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии высохших капель плазмы крови в диагностике пациентов с цереброваскулярной патологией.....509

ОРЕХОВА Н.А., МАРТЫНОВА А.А., ГУРИНА А.М., ЗАЖОГИН А.П., ШУНДАЛОВ М.Б.
Исследование минерального состава каменной части метеорита Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии.....511
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ДОЛГУШКИН Д.А., ВОЛОВА Л.Т., ЛАЗАРЕВ В.А., МАРКОВА М.Д., ЛОМКИНА А.В.
Применение метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки суставной поверхности после выполнения хонропластики у кроликов.....513
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ПИСАРЕВА Е.В., ВОЛОВА Л.Т., ФРОЛОВ О.О., ФЕДОРОВА Я.В., СУБАТОВИЧ А.Н.
Хемометрический анализ костной ткани при остеопорозе с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния.....515
КРАСНИКОВ И.В., СЕТЕЙКИН А.Ю., РОТ Б.
Современные подходы в моделировании взаимодействия оптического излучения с тканями в биомедицинских исследованиях.....517
ОНИКИЕНКО Е.В., РЫБАСЬ А.Ф.
Исследование биологических тканей методом стокс-поляриметрии.....519
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ЗЫБИН М.А., ЧЕРНЫЙ-ТКАЧ К.Б., ФРОЛОВ О.О., ИВЛИЕВ М.А., ДОЛГУШОВ Г.Г.
Хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния тканей зубов при периодонтите.....521
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ЗЫБИН М.А., ВОЛОВА Л.Т., ФРОЛОВ О.О., ДОЛГУШОВ Г.Г.
Спектральный анализ дентинных материалов.....523
ГЕРАСИМЕНКО А.В., ПОПОВ А.А.
Лазерно-абляционный синтез кремниевых наночастиц, обладающих резонансами Ми в видимом диапазоне, для биомедицинских применений.....525
КРЮЧКОВ Д.С., ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., САГИТОВА А.М.
Измерение поглощения молекул CO_2 с помощью широкополосного излучения суммарных частот СО лазера.....527
ШАДРИН Н.М., ЗАРИПОВ М.Р., КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А.
Лазерная система контроля радиального растяжения лопаток турбин в режиме реального времени.....529
КОПЬЕВ П.С., КОМАРОВА О.С., ЛЕНТОВСКИЙ В.В., ФЕДОРОВ Д.Л.
Исследование макетных образцов мощных полупроводниковых лазеров.....531
ШНЫРЕВ С.Л., ДОЛИН А.А., РЫБАКОВ М.А., СУЛТАНГУЛОВА А.И., КОНДРАШОВ А.А., КОЛЕСНИЧЕНКО А.А.
Разработка метода детектирования сероводорода в режиме реального времени с использованием частотно-перестраиваемого полупроводникового диодного лазера.....533

ДЬЯЧЕНКО В.В., ПРИВАЛОВ В.Е., ШЕМАНИН В.Г.
Определение дисперсного состава атмосферного аэрозоля лидаром.....535
ФЕДОРОВ Д.О., КОРЕНСКИЙ М.Ю., ЛАПШИН К.Э., ГАНИН Д.В., ВАРТАПЕТОВ С.К.
Сканирующий лазер для оптической когерентной томографии из коммерчески доступных компонентов.....537
ДУДОВА Д.С., ГАНИН Д.В., ШАВКУТА Б.С., КОРКУНОВА О.С., МИНАЕВ Н.В.
Лазерная двухфотонная печать оптических растров для задач прикладной оптики.....539
ОСТАНИН А.А., ЛИЦЗИН Ч., ЗАКОЛДАЕВ Р.А.
Фемтосекундная лазерная запись волноводных структур в пористых стеклах для сенсорных приложений.....541
ЖИГАРЬКОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.
Разрушение и модификация поглощающей металлической плёнки при лазерной печати.....543
ГОЖАЛЬСКИЙ Д.И., БАРАНОВ М.А., РЕЗНИК И.А., ДУБОВИК А.Ю., ЧЕРЕВКОВ С.А., ВЕНИАМИНОВ А.В.
Изучение нагрева лазерным пучком полупроводниковых нанопластин CdSe в интересах люминесцентной сканирующей микроскопии.....545
МИНАЕВА С.А., МИНАЕВ Н.В., МИРОНОВ А.В., МИРОНОВА О.А., СЯЧИНА М.А., КРУМИНЬШ Э.К., ХОДЛ С.М., ПОПОВ В.К.
Установка селективного лазерного спекания с высоким пространственным разрешением.....547
ГУБАЙДУЛЛИНА К.В., ВОЗИАНОВА А.В., МАСЮКОВ М.С., ХОДЗИЦКИЙ М.К.
Численное моделирование киральных метаповерхностей методом конечных разностей во временной области.....549
САХАРОВ М.В., СРЕДИН В.Г., ЗАПОНОВ А.Э., КОНРАДИ Д.С., КУЗНЕЦОВ И.В.
Имитационное моделирование эволюции тепловых полей, наведенных лазерным излучением в многослойных полупроводниковых структурах.....551
РЕЗНИК И.А., МАТЮШКИНА А.А., ДУБОВИК А.Ю., ОРЛОВА А.О.
Характеризация и фотоиндуцированное изменение оптических свойств магнитно-люминесцентных нанокомпозитов.....553
БЕЛОУСОВА И.М., ДАНИЛОВ О.Б., ЖЕВЛАКОВ А.П., ПОПОВА И.О., ШАГАНОВ И.И.
Фотофизические наноразмерные эффекты при фазовых переходах в оксидах ванадия.....555
РЕЗВЫХ А.Д., МЕГЕДЬ М.С., ДЕМЧЕНКО П.С., ХОДЗИЦКИЙ М.К.
Исследование оптических свойств тонких и ультратонких проводящих пленок с помощью импульсной терагерцовой спектроскопии.....557

ОЛЕЙНИЧУК Е.А., ТУЙЦЫНА А.А., ЖИГАРЬКОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.
Экспериментальное исследование лазерно-индуцированной термокавитации.....559
АЙМУХАНОВ А.К., ЗАВГОРОДНИЙ А.В., АХАТОВА Ж.Ж.
Оптические и фотоэлектрические характеристики тонких пленок дигидродибензотетраазааннулена.....561
АЙМУХАНОВ А.К., ЗАВГОРОДНИЙ А.В., ИЛЬЯСОВ Б.Р., ЗЕЙНИДЕНОВ А.К.
Влияние магнитного поля на ВАХ объемного гетероперехода полимерного солнечного элемента.....563
ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В., ВИНОГРАДОВА П.В., КИРЕЕВА Н.М., МАНЖУЛА И.С.
Моделирование процессов тепломассопереноса в солнечном коллекторе прямого поглощения излучения.....565
ОМАРОВА Г.С., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИБРАЕВ Н.Х.
Фотовольтаические свойства солнечных ячеек, сенсибилизованных полиметиновым красителем, в присутствии наночастиц Ag.....567
ЖУМАБЕКОВ А.Ж., КИМ М.С., САДЫКОВА А.Е., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В.
Влияние восстановленного оксида графена на электрофизические и фотокаталитические свойства TiO_2.....569
КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П., НОВИКОВА Ю.А.
Интерференционные фильтры с поглощающими металлическими пленками.....571
ВАНИН А.И., ПАНЬКОВА С.В., СОЛОВЬЕВ В.Г., ЦВЕТКОВ А.В., ЯНИКОВ М.В.
Оптические свойства нанокомпозита Sn/опал.....573
БАЛАН Н.Н., ИВАНОВ В.В., КУЗОВКОВ А.В., ХАРЧЕНКО Е.Л.
Методы повышения разрешающей способности проекционной оптической литографии в полупроводниковых технологиях современных проектных норм.....575
ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., ПЕЧЕНКИН А.А., САВЧЕНКОВ Д.В., ХОЛИНА М.С.
Применение перестраиваемого по длине волны фемтосекундного лазера для моделирования одиночных радиационных эффектов в ИС при облучении со стороны подложки.....577
БОГАЧКОВ И.В., КОМИСАРЧУК Н.А.
Программа для определения разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам.....579
ТАВЛЕЕВ А.А., АРАПОВ Ю.Д., КУБАСОВ П.В., ЯРОЩУК П.Н.
Определение скорости звука в оптических волокнах на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....581
БОГАЧКОВ И.В., АЛЕКСАНДРОВА А.И.
Выявление температурных воздействий на оптические волокна по бриллюэновским рефлектограммам.....583

БОГАЧКОВ И.В., КОМИСАРЧУК Н.А.
Программа для анализа бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон.....585
КАМЕНЕВ О.Т., ПЕТРОВ Ю.С., ПОДЛЕСНЫХ А.А.
Волоконно-оптический деформограф для систем прогноза опасных горнодинамических явлений.....587
ИДРИСОВ Р.Ф.
Эффективный метод расчета спектральных характеристик пропускания волоконно-оптической суперструктуры на основе внутриволоконных решеток Брэгга.....589
ПЕТРОВ Н.И.
Дальнопольное описание субволновых апертур.....591
ГОШЕВ А.А., ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н.
Вклад магнитной составляющей в спектр рассеяния электромагнитного аттосекундного импульса.....593
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н.
Об устойчивости интенсивных импульсов в планарных волноводах.....595
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И.
Плоский полимерный волновод с дифракционным элементом связи на изолирующем слое.....597
УКОЛОВ Д.С., ЧИРКОВ Н.А., МОЖАЕВ Р.К., ЧЕРНЯК М.Е., ПЕЧЕНКИН А.А.
Гониометрический стенд для измерения фотометрических параметров светодиодов.....599
ЖБАНОВА В.Л.
Фотоколориметр с широким телом цветового охвата.....601
БЛАНК А.В., БОГДАНОВ С.Д.
Правила распределяющей коммутации для фотовольтаических массивов.....603
БУСУРИН В.И., ШТЕК С.Г., ЖЕГЛОВ М.А., КОРОБКОВ К.А., БУЛЫЧЕВ Р.П.
Разработка контура «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента преобразователя ускорений с оптическим считыванием.....605
ГОРЯИНОВ В.С., БУЗНИКОВ А.А.
Модернизированный вариант портативного спектрометра РСС.....607
СИТНИКОВ Н.Н., ХАБИБУЛЛИНА И.А., МИТИН Д.Б., АШМАРИН А.А., ШЕЛЯКОВ А.В.
Рентгеноструктурные исследования быстрозакалённых лент из сплава TiNiCu.....609
ШОСТКА Н.В., СОКОЛЕНКО Б.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А.
Динамические пространственные оптические ловушки на основе трёхлучевой интерференции поляризованных пучков.....611
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., ДАНГ В.Х., ВО Ш.Х.
МОЭМ-преобразователь угловых скоростей с оптическим считыванием сигналов на основе интерферометра Фабри-Перо.....613

ТЫНЫШОВА Т.Д., ИСМАНОВ Ю.Х.
Моделирование оптической системы с входным зрачком круглой формы.....615
ПЕСНЯКОВ В.В., ВОЗИАНОВА А.В.
Некоторые особенности среды, полученной с помощью конформного отображения W = SIN(Z) 617
ЗЕМЦОВ Д.С., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ФАЗЛИЕВ Т.Ш., ХАФИЗОВ И.Ж.
Цифровая постдетекторная линеаризация аналогового оптического тракта С- и Х-диапазонов.....619
РОГОЖНИКОВ Г.С., РОМАНОВ В.В., МИШИНА И.В.
Передача изображений через свободное пространство посредством пространственно-временной модуляции электромагнитного излучения видимого и терагерцового диапазона.....621
СКРИПАЛЬ А.В., ДОБДИН С.Ю., ДЖАФАРОВ А.В.
Измерение расстояния частотно-модулированным лазерным автодином.....623
ЗАЧИНЯЕВ Ю.В., ГУДКОВА Ю.А., ШТОКОЛОВ А.А.
Гибридная система контроля скорости движения автомобиля на базе технологий VLC и RFID.....625
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Интерферометрия бокового сдвига для исследования динамических периодических структур.....627
ГУРОВ И.П., КУЛИКОВА Е.Н.
Метод динамической обработки многомерных интерферометрических сигналов в оптической когерентной томографии.....629
ЧЕРЕШНЕВ В.О., ФРОЛОВ С.В., ПРОСКУРИН С.Г.
Построение структурных ОКТ изображений на основе гистограммы распределения интенсивности пикселей.....631
ЧЕРЕШНЕВ В.О., ПРОСКУРИН С.Г.
Дифференциация структур различных тканей ОКТ изображений посредством анализа интенсивности пикселей.....633
КОЛОКОЛЬНИКОВ И.Н., САВЧЕНКО Е.А., ВЕЛИЧКО Е.Н.
Реализация метода оптической пульсовой денситометрии.....635
ЗАХАРОВ С.М.
Измерение артериального давления в режиме реального времени на основе фотоплетизмографии.....637
АНТОНОВ А.И.
Исследование влияния глубины и относительного периода рельефно-фазовой микроструктуры на предельно допустимые углы падения излучения.....639
КУЗЬМИН Д.В., ХАНЕВИЧ П.А., ОДИНОКОВ С.Б., МАРКИН В.В., ЖЕРДЕВ А.Ю., ШИШОВА М.В., БЕТИН А.Ю., НИКОНОРОВ Н.В., ИВАНОВ С.А.
Исследование и оценка полученных параметров угловой селективности брэгговских дифракционных решеток предельно малой толщины.....641

НАСТАС А.М., ИОВУ М.С., ТОЛСТИК А.Л., СТАШКЕВИЧ И.В.
Влияние коронного разряда на формирование голографических решеток в структурах металл - халькогенидный стеклообразный полупроводник.....643
БОРОДИНА Л.Н., БОРИСОВ В.Н., ВЕНИАМИНОВ А.В.
Люминесценция в сухом фотополимере Bayfol по данным лазерной сканирующей микроскопии.....645
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А., АРХИПОВ А.В.
Механизмы создания рельефных высокочастотных голографических структур на бихромированном желатине.....647
БОРИСОВ В.Н., ОКУНЬ Р.А., ЛЕСНИЧИЙ В.В., ПАВЛЮК А.С.
Исследование усадки в ходе голографической записи на примере фотополимеризующейся голографической среды Bayfol HX.....649
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И., ХРАМЦОВ Э.А.
Полимерный материал для прямой записи фазовых объемных голограмм в «красной» области спектра.....651
ПЕН Е.Ф.
Динамика одновременной записи голографических наложенных отражательных решёток в фотополимерном материале.....653
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.
Запись голограмм периодических структур в некогерентном свете 655
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х., ЖУМАЛИЕВ К.М.
Восстановление голограммы при нагреве фототермопластической плёнки лазерным лучом через поглощающую подложку.....657
АНУФРИК С.С., БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М.
Оптическая обработка многоэкспозиционных голограмм с повышением чувствительности измерений.....659
ГУБАРЕВ А.П., ШАЛЫГИН А.Н., ЩЕРБИНА А.Д., КУЗНЕЦОВ А.С., ОДИНОКОВ С.Б.
Защитные голограммы с латентными, случайно распределенными магнитными микроразмерными частицами.....661
ШОСТКА Н.В., СОКОЛЕНКО Б.В., ШОСТКА В.И.
Цифровая голографическая микроскопия захваченных микрочастиц с использованием оптического пинцета.....663
ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ А.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.
Применение методов машинного обучения для автоматической классификации живых и мертвых клеток на основе их фазовых изображений, полученных с помощью цифровой голографической микроскопии.....665
ЗЫКОВА Л.А., БУРМАК Л.И.
Цифровая голографическая эндоскопия с оптоволоконным опорным каналом.....667
ПАВЛОВ П.В., ВОЛЬФ И.Э., КУСКОВ И.Э., ХОБТА Р.Г.
Неразрушающий контроль остекления самолета методом компьютерной голографии.....669

ГЕОРГИЕВА А.О., БЕЛАШОВ А.В., ПЕТРОВ Н.В.
Коррекция волнового фронта с помощью управляемой матрицы микрозеркал и внеосевой цифровой голографии.....671
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., КУЗЬМИН И.Д., МОЛОДЦОВ Д.Ю., СТАРИКОВ Р.С.
Схема оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света.....673
ЕВТИХИЕВ Н.Н., ГОНЧАРОВ Д.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С., ТРОЦЕНКО Н.А., ФАЗЛИЕВ Т.Ш., ЭРЬКИН И.Ю.
Сравнение микрозеркального и фазового жидкокристаллического ПВМС как устройств ввода инвариантного оптико-цифрового коррелятора изображений.....675
КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А.
Применение жидкокристаллических пространственных модуляторов света с параллельным вводом сигналов в системах оптической обработки информации.....677
КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.
Экспериментальная реализация элементов однопиксельной камеры.....679
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., РОДИН В.Г.
Оптическое подавление спекл-шума для дифракционных элементов методом временного интегрирования разреженных изображений.....681
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М.,СТАРИКОВ Р.С., ТРОЦЕНКО Н.А.
Моделирование работы инвариантного корреляционного фильтра типа «maximum margin» 683
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С., ТРОЦЕНКО Н.А., ФАЗЛИЕВ Т.Ш.
Моделирование работы инвариантного оптико-цифрового коррелятора изображений с бинарным вводом данных.....685
КУРБАТОВА Е.А., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А.
Варьирование весовыми коэффициентами матриц при бинаризации цифровых голограмм операцией диффузии ошибки.....687
ЕВТИХИЕВ Н.Н., РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.
Синтез компьютерных голограмм с использованием машинного обучения...689
КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В.
Матричный контейнер цифровых данных для использования в системах оптической обработки информации.....691
ГОНЧАРОВ Д.С., ПЕТРОВА Е.К., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С.
Возможности использования цветовой информации для обнаружения и распознавания субпиксельных объектов в условиях зашумленности изображения.....693

Именной указатель авторов.....695

УДК 535(06)+004(06)

Р.В. РОМАШКО
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

АДАПТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Работа посвящена применению принципов адаптивной интерферометрии на основе многоволнового взаимодействия на динамических голограммах, формируемых в фоторефрактивных кристаллах, для акустических измерений. Рассмотрены различные схемы адаптивных лазерных интерферометров (АЛИ), а также типы первичных акустических приемников. Представлены результаты применения АЛИ для акустических и гидроакустических приложений, в том числе для задач неразрушающего контроля.

R.V. ROMASHKO
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok

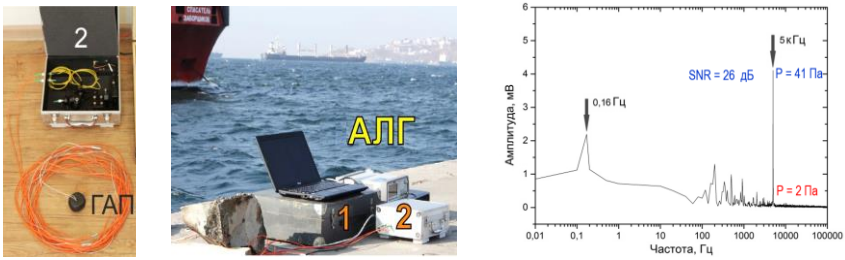
ADAPTIVE LASER INTERFEROMETRY IN ACOUSTIC MEASUREMENTS

The study is devoted to application of adaptive interferometry technique based on multi-wave mixing at dynamic holograms recorded in photorefractive crystal for the tasks of acoustics measurements. Different schemes of adaptive laser interferometers (ALI) as well as different types of primary acoustic sensors are presented. Results of practical application of ALI for air acoustic and hydroacoustic measurements and structural health monitoring are considered.

Настоящее исследование направлено на разработку нового поколения лазерных приемников акустических сигналов, обладающих повышенной пороговой чувствительностью и повышенной помехоустойчивостью по сравнению с традиционными электрическими приемниками. В основу разрабатываемых лазерных приемников положены принципы адаптивной голографической интерферометрии, а их ключевым элементом является динамическая фоторефрактивная голограмма, используемая для демодуляции сигналов волоконно-оптических первичных сенсоров акустических колебаний [1]. Поляризационная независимость динамической голограммы, достигаемая за счет использования для ее формирования геометрии ортогонального двух- и трёхволнового взаимодействия в кристалле кубической симметрии (CdTe) [2], позволяет в полной мере реализовать потенциальные преимущества волоконно-

оптических интерферометрических сенсоров за счет устранения поляризационного шума [3] и дрейфа рабочих характеристик, вызванных изменением поляризации, и как следствие, обеспечить регистрацию сверхслабых акустических сигналов в реальных условиях.

На рис. 1*а* и 1*б* представлено изображение адаптивного лазерного гидрофона (АЛГ), полевые испытания которого были проведены в морской акватории города Владивостока (бухта Золотой Рог, пролив Босфор Восточный) при температуре окружающей среды –3 °С, температуре воды 1 °С, скорости ветра 13 м/с, умеренном волнении моря и интенсивных портовых шумах, создаваемых движением судов. Из фурье-спектра выходного сигнала АЛГ (рис. 1*в*) видно, что постоянная составляющая регистрируемого сигнала содержит сильные (с амплитудой до 70 %) низкочастотные (0,16 Гц) флуктуации, вызванные воздействием на волоконно-оптический приемник морского волнения. Однако, за счет адаптивных свойств динамической голограммы обеспечивается устойчивое детектирование ГА сигнала (SNR = 26 дБ, 5 кГц).



а *б* *в*

Рис. 1. Внешний вид адаптивного лазерного гидрофона (*а*), размещенного на морском пирсе в ходе полевых испытаний в акватории морской бухты (*б*) (1 – лазерный модуль; 2 – интерферометрический модуль; ГАП – волоконно-оптический гидроакустический приемник) и фурье-спектр сигнала АЛГ (*в*)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00323).

Список литературы

1. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105 (3). P. 031101.

2. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Yu.N., Kamshilin A.A. Photorefractive vectorial wave mixing in different geometries // JOSA B. 2010. V. 27(2). P. 311-317.

3. Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Kamshilin A.A. Polarization-insensitive adaptive interferometer based on orthogonal three-wave mixing in photorefractive crystal // Pacific Science Review. 2011. V. 13(3). P. 252-254.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. КОЗЛОВ[1], М.В. МЕЛЬНИК[1], М.О. ЖУКОВА[1],
И.О. ВОРОНЦОВА[1], С.Э. ПУТИЛИН[1], А.Н. ЦЫПКИН[1],
С.-Ч. ЖАНГ[1,2], Р. БОЙД[3]
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Университет Рочестера, США
[3]Университет Оттавы, Канада

ВЫСОКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ РЯДА ЖИДКОСТЕЙ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Теоретически и экспериментально показано, что жидкости обладают высокой нелинейностью показателя преломления в терагерцовом спектральном диапазоне частот. Колебательный вклад в восприимчивость третьего порядка жидкостей в ТГц диапазоне на несколько порядков выше, чем типичный электронный для нелинейностей в оптическом диапазоне. Приведены результаты для воды, тяжелой воды, альфа-пинена и этанола.

S.A. KOZLOV[1], M.V. MELNIK[1], M.O. ZHUKOVA[1],
I.O. VORONTSOVA[1], S.E. PUTILIN[1], A.N. TCYPKIN[1],
X.-Ch. ZHANG[2], R.W. BOYD[3]
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]University of Rochester, USA
[3]University of Ottawa, Canada

HIGH NONLINEARITY OF THE REFRACTIVE INDEX OF A NUMBER OF LIQUIDS IN THE TERAHERTZ SPECTRAL RANGE

It has been shown theoretically and experimentally that liquids have a high nonlinearity of the refractive index in the terahertz frequency range. The vibrational contribution to the third-order susceptibility of liquids in the THz range is high several orders than the typical electronic one for nonlinearities in the optical range. The results for water, heavy water, alpha-pinene, and ethanol are presented.

Недавние достижения в терагерцовой технике и технологиях привели к появлению широкополосных источников ТГц излучения высокой интенсивности (10^{13} Вт/см^2 или выше) [1], что позволяет наблюдать нелинейные эффекты в этом спектральном диапазоне [2]. Важнейшим параметром, характеризующим нелинейность отклика материала в поле

интенсивных волн, является коэффициент его нелинейного показателя преломления n_2. Существует ряд различных методов оценки n_2. Наиболее распространенным является *Z*-скан метод [3]. Этот метод был первоначально разработан для монохроматического излучения. Однако он также применим в случае фемтосекундного импульсного излучения с широким спектром [4]. Было показано, что данный подход может быть использован и для широкополосного ТГц излучения [2, 5].

В данной работе произведена оценка коэффициента нелинейного показателя преломления различных сред, как оптических, так и жидких с использованием теоретического подхода, описанного в работе [6]. Эта подход учитывает вклад колебательного отклика в ТГц нелинейность в средах, который оказывается на несколько порядков больше, чем типичный электронный отклик. Эта модель предполагает, что природа нелинейности показателя преломления оптических сред в ТГц диапазоне спектра обусловлена ангармонизмом молекулярных колебаний.

Произведено прямое измерение коэффициента n_2 жидкостей (воды, тяжелой воды, альфа-пинена и этанола) для широкополосного импульсного ТГц излучения с помощью традиционного метода Z-сканирования. Поскольку этот метод работает только с плоскопараллельными образцами, использовалась плоская падающая струя воды, которая создавалась специальным соплом. Ламинарный поток течения жидкости струи позволил исключить термическую нелинейность.

Полученные экспериментальные результаты коэффициента нелинейного показателя преломления для воды 7×10^{-10} см^2/Вт, альфа-пинена 3×10^{-9} см^2/Вт и этанола 6×10^{-9} см^2/Вт, подтверждают проведенные оценки и природу высокой нелинейности показателя преломления ряда жидкостей в терагерцовом спектральном диапазоне. Таким образом, вода и другие жидкости в перспективе могут использоваться для управления параметрами ТГц излучения, что позволит приблизить внедрение новых технологий, а также развить новое направление в фундаментальной физике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00154.

Список литературы

1. Shalaby M., Hauri C. // Nature Communications. 2015. V. 6. P. 5976.
2. Tcypkin A. et. al. // Optics Express. V. 27. P. 10419-10425.
3. Sheik-Bahae M. et al. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. V. 26. P. 760-769.
4. Zheng X. et. al. // Optics Letters. 2015. V. 40, P. 3480.
5. Melnik M. et. al. // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 9146.
6. Dolgaleva K. et. al. // Physical Review A. 2015. V. 92. P. 023809.

УДК 535(06)+004(06)

Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ФОТОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обсуждаются возможности и проблемы применения фотонных аналого-цифровых устройств при построении радиотехнических систем.

R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

PHOTONIC ANALOG-DIGITAL DEVICES FOR MICROWAVE SYSTEMS

The possibilities and problems of using photonic analog-to-digital devices in the microwave systems are discussed.

Новейший прогресс элементной базы систем микроволновой фотоники (радиофотоники) обусловил всё более широкий спектр их практических применений – главным образом благодаря широкополосности и приемлемой энергоэффективности. В настоящее время имеется значительное количество примеров удачного, в том числе коммерчески успешного, использования технологий микроволновой фотоники при построении радиотехнических систем различного назначения – от ФАР до систем поддержки 5G. Основа любого устройства микроволновой фотоники – аналоговый оптический тракт (АОТ) – обеспечивает то или иное качество сигнала в силу технических и принципиальных физических ограничений [1, 2]. Качество сигнала АОТ характеризуется определёнными параметрами: отношением «сигнал/шум», свободным динамическим диапазоном и др., находящимися в естественном компромиссе с его энергетикой и полосой частот. В настоящее время имеются возможности реализации АОТ с чрезвычайно широкой полосой частот – в несколько сотен ГГц [3]. Современные приложения обработки сигналов требуют высокой цифровой точности, поэтому выходной сигнал АОТ должен быть подвергнут аналого-цифровому преобразованию. При этом возникает противоречие требований, предъявляемыми широкой полосой выходного сигнала АОТ и доступными полосой и точностью преобразования АЦП. В свою очередь, полоса и точность преобразования АЦП также имеют взаимные компромиссные ограничения [4]. В

настоящей работе кратко обсуждаются доступные на настоящее время характеристики АОТ с цифровым выходом; блок схема подобного АОТ представлена на рис. 1. Отдельно рассматриваются современные возможности выполнения аналого-цифрового преобразования, в том числе особо с использованием средств микроволновой фотоники [5, 6]. Представлен обзор новейших экспериментальных реализаций радиотехнических систем различного назначения с использованием средств микроволновой фотоники [7-10 и др.], отмечены возможности и перспективы миниатюризации и интегрального исполнения устройств микроволновой фотоники.

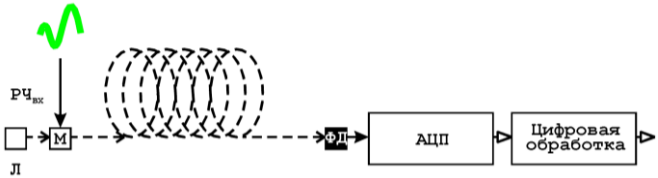


Рис. 1. Аналоговый оптический тракт с цифровым выходом, представлен вариант с внешней модуляцией света: РЧВХ - входной радиочастотный сигнал, Л - лазер, М - модулятор света, ФД - фотодетектор

Результаты обсуждения позволяют сделать выводы о том, что на настоящее время средства микроволновой фотоники обеспечивают следующие возможности: чрезвычайно широкая полоса частот по входу, высокая точность обработки высокочастотного сигнала при отсутствии необходимости переноса частоты вниз, возможность достижения приемлемой точности в широкой мгновенной полосе частот.

Список литературы

1. Cox C. III Analog Optical Links. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
2. Urick V. Fundamentals of Microwave Photonics. Wiley, 2015.
3. Burla M., Hoessbacher C., Heni W. et al. A 325 GHz analog photonic link // International Topical Meeting on Microwave Photonics. Ottawa, 2019. P. 1-3.
4. Walden R. Analog-to-digital conversion in the early twenty-first century // in The Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. John Wiley & Sons Inc, 2008. P. 126-138.
5. Valley G. Photonic analog-to-digital converters // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 1955-1982.
6. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2.
7. Ghelfi P., Laghezza F., Scotti F. et. al. A fully photonics-based coherent radar system // Nature. 2014. V. 507. P. 341-345.
8. Piqueras M. Recent progress in photonic ADC and its application to antenna systems // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Paphos, 2015. P. 1-4.
9. Xu Y., Li S., Xue X. et.al. An interleaved broadband photonic ADC immune to channel mismatches capable for high-speed radar imaging // IEEE Photonics Journal. 2019. V. 11. No. 4.
10. Cruz P., Alves T. Cartaxo A. SNR evaluation of WDM photonic ADCs in high-resolution radar systems» // International Conference on Transparent Optical Networks. Angers, 2019. P. 1-4.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. МАКСИМЕНКО
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛЕ $LiNbO_3$:Fe В СЛУЧАЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НЕКОГЕРЕНТНЫМ СВЕТОМ

В работе приводятся результаты экспериментального исследования кинетики фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития, легированных железом. Рассматривается случай, когда кристалл предварительно облучался некогерентным светом. Обсуждаются выявленные закономерности развития индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света.

V.A. MAKSIMENKO
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

PECULIARITIES OF THE PHOTOINDUCED LIGHT SCATTERING KINETICS IN $LiNbO_3$:Fe CRYSTAL IN THE CASE OF PREVIOUS IRRADIATION WITH NONCOHERENT LIGHT

The paper presents the results of an experimental study of the kinetics of photoinduced light scattering in lithium niobate crystals doped with iron. The case when the crystal was previously irradiated with noncoherent light is considered. The revealed regularities of the photoinduced light scattering indicatrix development are discussed.

Фотоиндуцированное рассеяние света (ФИРС) в кристаллах ниобата лития является следствием усиления затравочного рассеяния за счет энергообмена с излучением накачки [1]. Характеристики ФИРС зависят как от параметров излучения накачки (длина волны, интенсивность, поляризация), так и от свойств кристалла (электрооптических, фотоэлектрических и т.п.) [2].

Механизм усиления рассеянных волн имеет голографическую природу [1, 3] и, следовательно, ФИРС возникает только в случае освещения кристалла когерентным излучением. Однако можно предположить, что дополнительное освещение кристалла некогерентным светом может повлиять на характер ФИРС, а изучение полученных закономерностей даст дополнительную информацию о процессах переноса фотогенерированного заряда в кристаллах.

ФИРС в кристаллах ниобата лития изучено достаточно подробно [1-4]. Однако в литературе практически не освещен вопрос, как воздействует дополнительное некогерентное излучение на процесс ФИРС. В данной работе мы рассмотрели влияние предварительного освещения кристалла ниобата лития некогерентным светом на развитие фотоиндуцированного рассеяния света.

В качестве образца использовался кристалл ниобата лития, легированный железом (0,03 % весовых). Кристалл представлял собой плоскопараллельную пластинку *x*-среза толщиной 1 мм. В качестве источника некогерентного света был взят светодиод, излучающий в видимом диапазоне (белый свет) мощностью 0,5 Вт. Источником когерентной накачки для возбуждения ФИРС являлся гелий-неоновый лазер (длина волны 632,8 нм, мощность 60 мВт).

Нами был обнаружен следующий эффект – при достаточно длительном предварительном освещении образца светодиодом (в течение 30 минут) скорость развития ФИРС значительно увеличивалась. Так, если время достижения максимального угла раскрытия конуса ФИРС в отсутствии предварительного освещения составляло 120 с, то в случае, когда кристалл заранее освещался светодиодом, соответствующее время оказывалось равным 30 с. При этом надо отметить, что сам максимальный угол раскрытия конуса ФИРС был практически одинаков в обоих случаях и составлял приблизительно 10 ˚.

Можно предположить, что длительное освещение кристалла светодиодом приводит к истощению глубоких примесных центров, ответственных за фотогенерацию свободных носителей заряда, и переносу заряда на более мелкие ловушки. Таким образом, концентрация центров, энергия активации которых меньше энергии фотонов излучения гелий-неонового лазера, будет расти. В результате, скорость фотоиндуцированного изменения показателя преломления кристалла может увеличиться.

Список литературы

1. Magnusson R., Gaylord T. Laser scattering induced holograms in $LiNbO_3$ // Appl. Opt. 1974. V. 13. № 7. P. 1545-1548.

2. Максименко В.А., Сюй А.В., Карпец Ю.М. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. М.: Физматлит, 2008.

3. Guibaly F., Young L. Optically induced light scattering and beam distortion in iron-doped lithium niobate // Ferroelectrics. 1983. V. 46. P. 201-208.

4. Сидоров Н.В., Мануковская Д.В., Палатников М.Н. Фрактальный анализ картин фотоиндуцированного рассеяния света в стехиометрических кристаллах ниобата лития // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 18. № 6. С. 108-117.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, С.В. СМИРНОВ,
А.В. ДУБИКОВ, В.Я. ШУР[1], А.Р. АХМАТХАНОВ[1], А.А. ЕСИН[1]
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
[1]Уральский федеральный университет, Екатеринбург

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ С НАКЛОННЫМИ СТЕНКАМИ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ В ПРИЛОЖЕННОМ ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Экспериментально установлено, что время релаксации эффективности дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре с наклонными стенками в кристалле 5%MgO:$LiNbO_3$ в приложенном постоянном электрическом поле уменьшается с ростом интенсивности зондирующего светового пучка.

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, S.V. SMIRNOV,
A.V. DUBIKOV, V.Ya. SHUR[1], A.R. AKHMATKHANOV[1], A.A. ESIN[1]
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
[1]Ural Federal University, Ekaterinburg

LIGHT DIFFRACTION ON PERIODICALLY POLED DOMAIN STRUCTURES WITH ICLINED WALLS IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL IN AN APPLIED STATIC ELECTRIC VOLTAGE

It was experimentally established that the relaxation time of the Bragg diffraction efficiency decreases with increasing intensity of the probe light beam in a 5%MgO:$LiNbO_3$ crystal with a regular domain structure with inclined walls and an applied static electric field.

Нестационарное поведение эффективности дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре (РДС) с наклонными стенками в кристалле 5%MgO:$LiNbO_3$, наблюдаемое после приложения к ней внешнего постоянного электрического поля, связывается в [1] с его экранировкой, обусловленной проводимостью таких заряженных доменных стенок. Представленные в [1] экспериментальные результаты получены при фиксированной интенсивности зондирующего лазерного пучка I_p, что оставляет открытым вопрос о типе проводимости и её зависимости от I_p.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования временной эволюции эффективности брэгговской дифракции света на РДС с наклонными стенками в том же образце 5%MgO:$LiNbO_3$ [1], имеющей место при различных значениях интенсивности зондирующего пучка, после приложения постоянного электрического поля с напряженностью E_0 = 3.5 кВ/см. Гауссов лазерный пучок с длиной волны λ = 632.8 нм и апертурой 0.7 мм, поляризованный вдоль оси Z и фокусируемый в середину образца сферической линзой с фокусным расстоянием 350 мм, распространялся в плоскости XY под брэгговским углом к оси Y с преобразованием в дифрагированную волну на длине взаимодействия d = 2 мм. Нормированные к максимуму осциллограммы временных зависимостей эффективности дифракции η/η_{max} для различных значений интенсивности зондирующего пучка представлены на рис. 1.

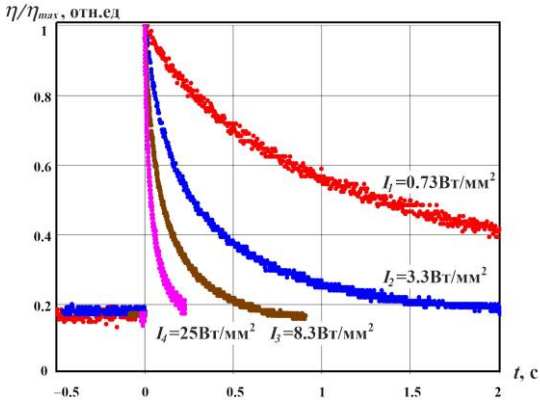


Рис. 1. Зависимости от времени нормированных дифракционных эффективностей в первом дифракционном максимуме при включении постоянного внешнего напряжения U = 350В для световых пучков с интенсивностями 0.73, 3.3, 8.1 и 25 Вт/мм^2

Из наблюдаемых зависимостей следует, что проводимость совокупности доменных стенок РДС в кристалле 5%MgO:$LiNbO_3$, имеющих угол наклона 0.31° к полярной оси [1], растет с интенсивностью зондирующего пучка I_p.

Список литературы

1. Savchenkov E.N., Shandarov S.M., Smirnov S.V., Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Ya. // JETP Letters. 2019. V. 110. No. 3. P. 178.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. СМИРНОВ, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ, В.Б. ПИКУЛЕВ[1]

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.
[1]Петрозаводский государственный университет

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ РАЗНОГО СОСТАВА И ГЕНЕЗИСА

Проведено сравнение фотолюминесценции номинально чистых с разным отношением Li/Nb и легированных цинком конгруэнтных монокристаллов ниобата лития, а также монокристаллов, выращенных из шихты легированной неметаллическим элементом бором.

M.V. SMIRNOV, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV, V.B. PIKULEV[1]

I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region
[1]Petrozavodsk State University

THE FEATURES OF PHOTOLUMINESCENCE OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS OF DIFFERENT COMPOSITION AND GENESIS

The comparison of photoluminescence of both nominally pure with different Li/Nb ratio and Zn-doped congruent lithium niobate single crystals as well as ones grown from charge doped by non-metallic boron was carried out.

Нелинейно-оптический кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) оптически прозрачен в диапазоне 320 - 5000 нм. Наличие точечных дефектов катионной подрешетки в виде неправильно расположенных в октаэдре катионов и вакантных октаэдров приводит к появлению новых уровней энергии в запрещенной зоне. Образование дефектов зависит от отношения R = Li/Nb в кристалле, метода легирования и типа легирующего элемента. В данной работе исследована фотолюминесценция конгруэнтного кристалла $LiNbO_3$ ($LiNbO_{3конг}$, R = 0.946), легированного цинком конгруэнтного кристалла $LiNbO_3$:Zn(6.5 мол. % ZnO), стехиометрических кристаллов (R = 1), выращенных двумя способами – из расплава с 58.6 мол.% Li_2O ($LiNbO_{3стех}$) и из конгруэнтного расплава с добавлением

щелочного флюса 6 мас. % K_2O ($LiNbO_{3стех}$:K_2O 6.0 мас. %), а также кристалла $LiNbO_3$:B (0.12 мас.% в шихте). Все кристаллы были выращены методом Чохральского в воздушной атмосфере. Подробно выращивание кристаллов описано в работе [1].

Спектры (рис. 1) получены с помощью спектрографа SL 100M (Solar TII) с ПЗС-детектором (FLICCDML063710) при комнатной температуре. Источник возбуждения спектров – He-Cd лазер ($\lambda_{возб}$ = 325 нм) с мощность 15 мВт. Каждый спектр исправлялся на фоновый сигнал.

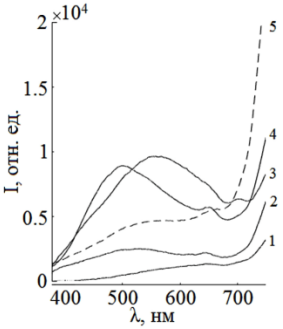


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кристаллов: 1 – $LiNbO_3$:B, 2 – $LiNbO_{3стех}$, 3 – $LiNbO_{3конг}$, 4 – $LiNbO_3$:Zn, 5 – $LiNbO_3$:K_2O

Из рис. 1 видно, что спектры всех исследованных кристаллов характеризуются широкой полосой люминесценции в видимой области и резким подъёмом в ближней ИК-области. Фотолюминесценция наиболее интенсивна для кристалла $LiNbO_{3конг}$, ввиду наличия в его структуре максимального количества активных центров свечения – дефектов Nb_{Li}, дающих максимум при 550 нм. В условиях зарядовой компенсации образуются также точечные дефекты V_{Li} и V_{Nb} (500 и 380 нм), которые вносят свой вклад в общий люминесцентный сигнал. Наличие в кристалле $LiNbO_3$ гидроксильных групп OH, создающих комплексные дефекты в структуре типа Nb_{Li}-OH и др. приводит к передаче энергии между центрами через безызлучательные переходы, тем самым повышая интенсивность длинноволновой области спектра. Для кристалла $LiNbO_3$:Zn(6.5 мол. % ZnO) характерно появление в спектре дополнительные полос (475 и 520 нм). Природа этих полос может быть обусловлена образованием новых дефектов вблизи концентрационного порога при 7.0 мол. % ZnO, вследствие изменения механизма вхождения Zn в структуру кристалла. Интенсивность фотолюминесценции наименьшая для кристаллов $LiNbO_{3стех}$ и $LiNbO_3$:B(0.12 мас.% в шихте), что свидетельствует о малом количестве в их структуре центров свечения различного типа. При этом кристалл $LiNbO_3$:B показывает наилучшее оптическое качество: в нем практически отсутствует излучательная рекомбинация центров свечения.

Список литературы

1. Palatnikov M.N., Birukova I.V., Masloboeva S.M., Makarova O.V., Manukovskaya D.V.. Sidorov N.V. // J. Cryst. Grown. 2014. V. 386. P. 113-118.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ШУГУРОВ[1], С.Б. БОДРОВ[1,2], М.И. БАКУНОВ[1]
[1]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*
[2]*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ ВЫРОЖДЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

Экспериментально продемонстрирована возможность эллипсометрического детектирования волновой формы терагерцовых волн в двулучепреломляющем кристалле ниобата лития при распространении пробного оптического импульса вдоль оптической оси кристалла. Такая ориентация кристалла позволяет устранить влияние сильного собственного двулучепреломления кристалла на пробный импульс. Проведено сравнение данного метода с другими методами детектирования терагерцовых волн.

A.I. SHUGUROV[1], S.B. BODROV[1,2], M.I. BAKUNOV[1]
[1]*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*
[2]*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

ELLIPSOMETRIC DETECTION OF TERAHERTZ WAVES IN LITHIUM NIOBATE IN DEGENERATE CONFIGURATION

We demonstrate experimentally ellipsometric electro-optic sampling of terahertz waves by femtosecond laser pulses in a lithium niobate crystal in the degenerate configuration, when the probe optical pulse propagates along the optical axis of the crystal. This configuration allows one to avoid the effect of strong intrinsic birefringence of lithium niobate on the probe optical pulse. The proposed technique is compared with other methods of terahertz detection.

Для измерения временной формы импульсных терагерцовых полей широко используется метод электрооптического (ЭО) стробирования этих полей фемтосекундными лазерными импульсами в ЭО кристаллах. В данном методе регистрируется изменение поляризации пробного оптического импульса, возникающее вследствие эффекта Поккельса при совместном распространении пробного и измеряемого терагерцового импульсов в кристалле. Измерения при различных временных задержках пробного импульса позволяют восстановить временную форму терагерцового импульса. Условием эффективного ЭО стробирования является равенство групповой оптической и фазовой терагерцовой

скоростей. В кристаллах с сильным различием этих скоростей, таких как ниобат лития ($LiNbO_3$), было предложено использовать схему неколлинеарного (черенковского) синхронизма [1]. Недостатком кристалла $LiNbO_3$ является сильное собственное двулучепреломление, для компенсации которого в работе [1] пришлось применять дополнительные оптические элементы и усложнять схему детектирования. В данной работе мы демонстрируем возможность устранения негативного влияния собственного двулучепреломления кристалла $LiNbO_3$ на эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн за счет использования вырожденной конфигурации, в которой пробный оптический импульс распространяется вдоль оптической оси кристалла.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Пробный оптический импульс фокусировался в кристалл $LiNbO_3$, где распространялся вдоль оптической оси. Терагерцовый импульс фокусировался в кристалл сквозь кремниевую призму с углом среза 41°. Поляризации оптического и терагерцового импульсов были выбраны ортогональными оптической оси кристалла. Таким образом, оба импульса распространялись как обыкновенные волны, что позволяло осуществлять детектирование поляризационных изменений оптического импульса стандартным методом. Полученный амплитудный спектр показан на рис. 2; спектр, полученный с помощью фотопроводящей антенны (ФПА), приведен для сравнения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No. 3.3854.2017/4.6.)

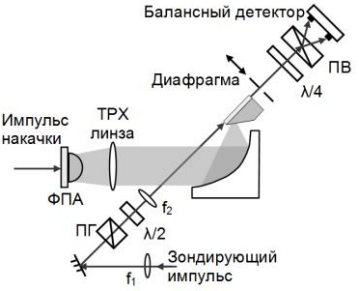


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

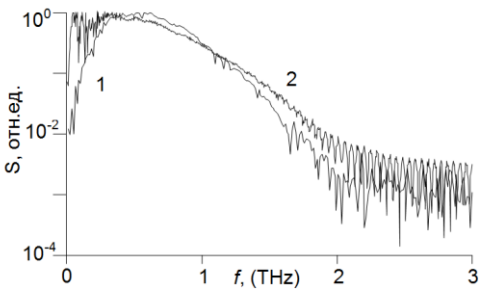


Рис. 2. Амплитудные спектры, полученные данным методом (1) и с помощью ФПА (2)

Список литературы

1. Tani M., Horita K. et. al. // Opt. Express. 2011. V. 19. P. 19901.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.И. ИВАНОВА
Тверской государственный университет

ДЕГРАДАЦИЯ ПЛАТИНОВЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТЯХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ

Приведены результаты исследования поведения напылённых платиновых слоев на поверхности монокристаллов парателлурита и ниобата лития при нагреве до температуры 80°С. Сделаны выводы о процессах массопереноса в зависимости от толщины слоя, шероховатости поверхности элементов, области напыления и наличия дефектов в приповерхностных слоях.

S.A. TRETIAKOV, I.A. KAPLUNOV, A.I. IVANOVA
Tver State University

THE DEGRADATION OF PLATINUM FILMS ON SURFACES OF SINGLE CRYSTALS AT HEATING

Presents the results of researches the behavior of deposited platinum layers on the surface of single crystals of paratellurite and lithium niobate at heating to a temperature of 80 °C. Formulating conclusions about the processes of mass transfer depending on the thickness of the layer, the surface roughness of the elements, the deposition region and the presence of defects in the surface layers.

В акустооптике при соединении оптического элемента и пьезоэлемента в качестве связующего слоя используются различные металлы с применением термокомпрессионного, ультразвукового компрессионного, холодного компрессионного и др. способов сварки [1]. При эксплуатации акустооптических приборов с элементами из парателлурита (TeO_2) процесс отслоения пьезопреобразователя ($LiNbO_3$) от кристалла во многом связан с процессами деградации этих слоев при работе устройств в условиях повышенных температур. В рабочем режиме температура нагрева светозвукопровода (СЗП) составляет 40-50 °С, а при повышенной мощности акустической волны достигает 70-80 °С (при градиентах температуры внутри СЗП – 4-8 град./см) [2]. Также некоторый вклад в общий нагрев, в связи с малыми областями воздействия, вносит процесс поглощении излучения материалом от мощных импульсных лазеров.

Целью работы являлось исследование процессов деградации платиновых пленок, напыленных на монокристаллы парателлурита и

ниобата лития, в процессе нагрева до температур, соответствующих критическим температурам при работе акустооптических устройств.

На полированные поверхности монокристаллов наносились методом вакуумного напыления слои платины разной толщиной (в диапазоне 10 - 60 нм). Регистрация профилей поверхностей образцов (рис. 1 и 2) при различных температурах осуществлялась с помощью оптического профилометра NanoMap WLI 1000, предметный столик которого был снабжён нагревательным элементом Пельтье.

При анализе полученных результатов сделаны выводы, что процессы коробления и истончения имеют место вследствие массопереноса связующего слоя и что происходит преимущественно по краям образцов. При толщине связующего слоя порядка 60-80 нм (нагрев элементов ~ 75-80 °С) процессы деградации во внутренних областях слоя несущественны и не приводят к разрушению; при толщине 10-20 нм возникает островная структура. Отмечается, что массоперенос существенно выше при наличии напряжений, вызванных дефектами структуры приповерхностного слоя.

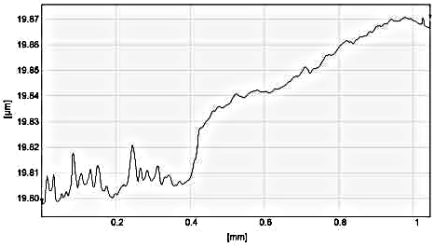


Рис. 1. Профиль платинового слоя на кристалле ниобата лития на границе напыления при нагреве до температуры 80 °С

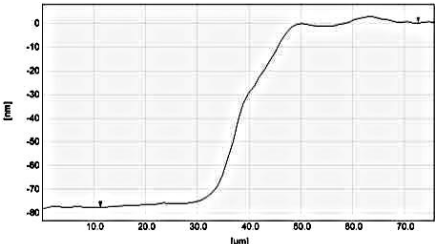


Рис. 2. Профиль платинового слоя на кристалле парателлурита на границе напыления при нагреве до температуры 80 °С

Список литературы

1. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСИС, 2015.

2. Tretiakov S., Grechishkin R., Kolesnikov A., Kaplunov I., Yushkov K., Molchanov V., Linde B.B.J. Characterization of temperature field distribution in large-size paratellurite crystals applied in acousto-optic devices // Acta Physica Polonica A. 2015. Т. 127. № 1. С. 72-74.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ЧИЖИКОВ, К.Б. ЮШКОВ, В.Я. МОЛЧАНОВ
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $NaBi(MoO_4)_2$

В работе описана разработка, изготовление и испытание акустооптического (АО) модулятора из кристалла молибдата натрия висмута $NaBi(MoO_4)_2$. Создан экспериментальный образец модулятора на продольной акустической волне в Z-срезе. Показано что эффективность изотропной дифракции составила не менее 80 % на длине волны света 1064 нм при управляющей мощности 2,5 Вт.

A.I. CHIZHIKOV, K.B. YUSHKOV, V.Ya. MOLCHANOV
National University of Science and Technology MISIS, Moscow

ACOUSTO-OPTIC MODULATOR BASED ON $NaBi(MoO_4)_2$ CRYSTAL

This work describes the development, manufacturing and testing of acoustooptic (AO) modulator made of sodium bismuth molybdate $NaBi(MoO_4)_2$ crystal. An experimental prototype of a modulator based on a longitudinal acoustic wave in a Z-cut of the crystal has been created. The efficiency of isotropic diffraction was at least 80 % at the wavelength of 1064 nm with a driving RF power of 2.5 W.

Молибдат натрия висмута ($NaBi(MoO_4)_2$.) является синтетическим тетрагональным монокристаллом группы шеелита. В работах [1-3] рассмотрены некоторые свойства кристалла $NaBi(MoO_4)_2$. Была показана возможность и перспективность применения $NaBi(MoO_4)_2$. Нами проведены исследования акустических и АО свойств кристалла $NaBi(MoO_4)_2$. Рассчитаны значения фазовых скоростей, углов сноса энергии ультразвуковых волн и коэффициент АО качества M_2 в зависимости от направления распространения акустической волны. Кристалл обладает слабой анизотропией упругих и фотоупругих свойств, при этом близость значений констант p_{13} и p_{33} позволяет сделать вывод о возможности создания модулятора со слабой чувствительностью к поляризации света на продольной акустической волне в Z-срезе. Данная конфигурация выбрана для создания АО модулятора (АОМ).

Для сопоставления характеристик кристалла $NaBi(MoO_4)_2$ с парателлуритом (TeO_2) был изготовлен экспериментальный образец АОМ с центральной частоты 120 МГц. Создание пьезопреобразователя путем

присоединения пьезопластины ниобата лития $LiNbO_3$ к АО кристаллу проводилось при помощи вакуумной диффузионной сварки для обеспечения высокой эффективности преобразования [4, 5].

Измерение дифракционной эффективности проводилось на λ = 1064 нм и осуществлялось для двух взаимно перпендикулярных поляризаций лазерного луча. Диаметр перетяжки составлял 0.4 мм. Эффективность дифракции для двух ортогональных поляризаций лазерного пучка отличаются не более чем на 10 %. При управляющей мощности 2.5 Вт она составила 80 % для вертикальной поляризации света и 87 % для горизонтальной соответственно.

Экспериментальный прототип АОМ на основе $NaBi(MoO_4)_2$ продемонстрировал высокую эффективность, аналогичную АОМ на TeO_2. Полученная в результате экспериментов оценка $M_2 \approx 20\times10^{-15}$ $с^3/кг$ соответствует расчетам с фотоупругими константами $p_{13} = 0.25$ и $p_{33} = 0.29$ [1].

Наряду с высокой акустооптической эффективностью кристалл $NaBi(MoO_4)_2$ технологичен на разных этапах изготовления приборов, что демонстрирует возможность его использования в серийном производстве АОМ. При этом необходимо дополнительно исследовать его теплофизические свойства, лазерную стойкость и затухание высокочастотных ультразвуковых волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-07-00670)

Список литературы

1. Akimov S.V. et. al. // Solid State Physics. 1977. V. 19. P. 1832.
2. Moiseenko V.N. et. al. // Optics and Spectroscopy. 1998. V. 84. P. 253.
3. Martynyuk-Lototska I. et. al. // Ukrainian Journal of Physics. 2015. V. 16. P. 76.
4. Chizhikov S.I., Molchanov V.Ya // Patent RU 2461097 C1 of 03.03.2011.
5. Gurov V.V. et. al. // Patent RU 2646517 C1 of 05.03.2018.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ЖУРИН, С.М. ШАНДАРОВ, Е.С. СИМ, М.Г. КИСТЕНЕВА
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ КРИСТАЛЛОВ КЛАССА СИЛЛЕНИТОВ

Представлены результаты численного моделирования дифференциальных характеристик спектра пропускания кристалла $Bi_{12}TiO_{20}$:Al, относящегося к классу силленитов.

T.A. ZHURIN, S.M. SHANDAROV, E.S. SIM, M.G. KISTENEVA
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

DIFFERENTIAL CHARACTERISTICS OF THE TRANSMISSION SPECTRA OF SILLENITE CRYSTALS

The results of a numerical calculations of the differential parameters of the transmission spectrum of the $Bi_{12}TiO_{20}$: Al crystal related to sillenite class are presented.

Один из методов определения характеристик дефектов в кристаллах класса силленитов, связанных с внутрицентровыми переходами, основан на изучении спектральные зависимостей первой и второй производной оптического пропускания образцов [1]. Однако модель примесного оптического поглощения в силленитах [2] предполагает вклад в него не только таких внутрицентровых переходов, но и процессов фотоионизации глубоких донорных центров. В настоящем сообщении представлены результаты численного моделирования дифференциальных характеристик спектра пропускания образца $Bi_{12}TiO_{20}$:Al с толщиной $d = 6{,}6$ мм, с использованием модели и данных из работы [2].

Полученные в результате моделирования спектральные зависимости для оптического пропускания (кривая 1) и его первой (2) и второй (3) производных представлены на рис. 1а. На рис. 1б кривые 1-5 отображают используемые при моделировании спектральные зависимости гауссовых компонент, дающих аддитивный вклад внутрицентровых переходов в примесное поглощение.

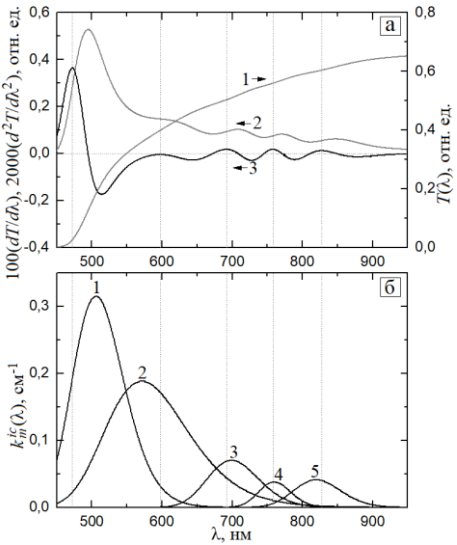


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента пропускания $T(\lambda)$ и его производных для образца $Bi_{12}TiO_{20}$:Al (а) и пяти гауссовых компонент $k_m^{ic}(\lambda)$, дающих аддитивный вклад в показатель поглощения (б)

Вертикальные линии на рис. 1 проведены через максимумы для второй производной пропускания образца, три из которых (при λ = 691, 756 и 826 нм) близки по спектральному положению максимумов для учитываемых при моделировании гауссовых компонент (кривые 3, 4 и 5 на рис. 1б).

Однако максимумы второй производной пропускания на длинах волн λ = 472 и 598 нм имеют значительные сдвиги относительно максимумов гауссовых компонент 1 и 2, что может быть связано со значительным вкладом в примесное поглощение, в данной области спектра, процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров.

Таким образом, дифференциальные характеристики спектров пропускания силленитов позволяют идентифицировать дефекты, для которых имеют место внутрицентровые переходы, только в диапазоне, где вклад в примесное поглощение процессов фотоионизации глубоких донорных центров относительно невелик.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017-2019 годы (проекты № 3.8898.2017/8.9 и № 3.1110.2017/4.6).

Список литературы

1. Petkova P., Kostova B., Marinova V., Tacheva J. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2010. V. 15. P. 012070.

2. Кистенева М.Г., Худякова Е.С., Шандаров С.М. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 7. С. 685-690.

УДК 535(06)+004(06)

А.Л. НОВОКОВСКАЯ, М.А. КУРНИКОВ, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ФРОНТЕ ИОНИЗАЦИИ В КРИСТАЛЛЕ GaP

Теоретически исследовано преобразование волновой формы и спектра терагерцового импульса при отражении от движущегося в кристалле GaP фронта ионизации. Показано, что отраженный импульс может испытывать сильное сжатие при незначительном уменьшении амплитуды и иметь практически равномерный спектр в широком интервале терагерцовых частот.

A.L. NOVOKOVSKAYA, M.A. KURNIKOV, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

CONVERSION OF TERAHERTZ PULSES AT AN IONIZATION FRONT IN A GaP CRYSTAL

The reflection of a terahertz pulse from a counter-propagating ionization front in a GaP crystal is considered theoretically. It is shown that the reflected pulse with a highly uniform spectrum or with a time duration much shorter than the incident pulse can be generated.

В последнее время возник интерес к исследованию возможностей частотного преобразования терагерцовых импульсов за счет отражения от фронта ионизации, создаваемого в полупроводнике фемтосекундным лазерным импульсом высокой интенсивности [1, 2]. Теоретическое рассмотрение и эксперименты проводились применительно к однофотонной ионизации кремния импульсами титан-сапфирового лазера [1, 2]. В этом случае, однако, происходит быстрое истощение импульса накачки, что приводит к нестационарному характеру распространения фронта ионизации: длина распространения фронта в кристалле ограничена величиной ~10 мкм, а плотность создаваемой на фронте плазмы резко спадает по мере удаления фронта от границы кристалла. Гораздо большие длины распространения могут быть достигнуты при создании фронта ионизации путем многофотонной ионизации полупроводника чирпированными лазерными импульсами [3]. При этом характер распространения фронта близок к стационарному.

В данной работе исследовано преобразование волновой формы и спектра терагерцового импульса при отражении от стационарно

движущегося в электрооптическом кристалле фронта ионизации. Предполагается, что фронт ионизации и терагерцовый импульс создаются двумя частями одного и того же лазерного пучка, распространяющимися в кристалле навстречу друг другу. Рассмотрено отражение от фронта как свободно распространяющегося терагерцового импульса, так и терагерцового поля, распространяющегося вместе с лазерным импульсом (вынужденного поля [4]). Расчеты проведены для кристалла GaP при накачке титан-сапфировым лазером (длина волны 0,8 мкм).

На рис. 1 показаны результаты расчета волновой формы и спектра отраженного импульса в случае падающего терагерцового импульса униполярной формы (результаты для свободно распространяющегося и вынужденного импульсов неразличимы). В результате отражения происходит сильное сжатие терагерцового импульса при незначительном уменьшении амплитуды (рис. 1а). Спектр импульса является практически равномерным в интервале 0-5 ТГц (рис. 1б). Такие импульсы могут быть перспективны для использования в терагерцовой спектроскопии.

Обнаружен также эффект запаздывания отражения: падающий импульс практически полностью проходит за фронт ионизации, прежде чем начинает формироваться отраженный импульс.

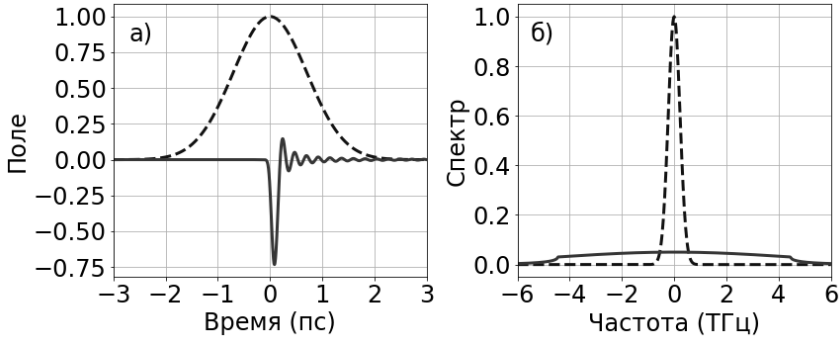


Рис. 1. Волновая форма (а) и спектр (б) падающего (штриховая линия) и отраженного (сплошная линия) терагерцовых импульсов, длительность падающего импульса равна 1 пс, плазменная частота создаваемой на фронте плазмы – 1 ТГц

Список литературы

1. Thomson M.D., Tzanova S.M., Roskos H.G. // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 085203.
2. Meng F., Thomson M.D., Roskos H.G. // Phys. Rev. B. 2014. V. 90. P. 155207.
3. Efimenko E.S., Sychugin S.A., Tsarev M.V., Bakunov M.I. // Phys. Rev. A. 2018. V. 98. P. 013842.
4. Bakunov M.I., Tsarev M.V., Bodrov S.B., Tani M. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 083111.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. КУРНИКОВ, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В КРИСТАЛЛЕ ZnTe В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

Приведены результаты численного моделирования нелинейно-оптической генерации терагерцового излучения импульсами фемтосекундного титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe в условиях высокой оптической интенсивности, когда существенна двуфотонная ионизация кристалла. Проведено сравнение результатов расчетов формы терагерцового импульса и эффективности преобразования с имеющимися экспериментальными данными.

M.A. KURNIKOV, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

OPTICAL-TO-TERAHERTZ CONVERSION IN A ZnTe CRYSTAL IN THE REGIME OF FREE CARRIER GENERATION

The results of numerical modeling of the nonlinear optical generation of terahertz radiation by femtosecond Ti:sapphire laser pulses in a ZnTe crystal are presented. The calculations were performed for high intensities of the optical pump, when two-photon ionization of the crystal is essential. The calculated terahertz waveforms and optical-to-terahertz conversion efficiency are compared with existing experimental results.

Оптическое выпрямление импульсов фемтосекундного титан-сапфирового лазера (длина волны ~0,8 мкм) в кристалле ZnTe является распространенным методом генерации терагерцового излучения в связи с выполнением в этом кристалле условия коллинеарного оптико-терагерцового синхронизма. Теоретическому исследованию оптико-терагерцового преобразования в кристалле ZnTe посвящен целый ряд работ, см., например, [1, 2]. При этом обычно рассматривается случай умеренных оптических интенсивностей, когда двухфотонное поглощение накачки и вызванная им генерация свободных носителей пренебрежимо малы [1, 2]. В то же время в экспериментах зачастую используют предельно высокие интенсивности накачки, чтобы увеличить эффективность оптико-терагерцового преобразования [3, 4]. В этом случае двухфотонное поглощение и генерация носителей считаются

основными факторами, ограничивающими эффективность преобразования. При теоретическом анализе насыщения эффективности при высоких интенсивностях накачки фотогенерация носителей учитывается непоследовательно – через введение дополнительного поглощения [5, 6]. При этом не учитывается нестационарность образующейся плазмы, которая может приводить к дополнительным эффектам, например, генерации субтерагерцовых предвестников перед импульсом накачки [7].

В данной работе на основе численного моделирования с помощью специально разработанного FDTD кода проведено последовательное исследование влияния фотогенерации свободных носителей на форму терагерцового импульса и эффективность оптико-терагерцового преобразования.

На рис. 1 и 2 приведены некоторые результаты численного моделирования. Расчёты проводились при длительности оптического импульса 150 фс и толщине кристалла 2 мм.

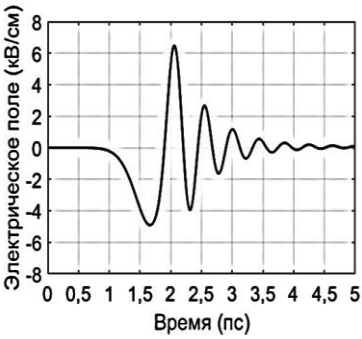


Рис. 1. Форма терагерцового импульса при энергии импульса накачки 380 мкДж (пиковой интенсивности 4,8 ГВт/см^2)

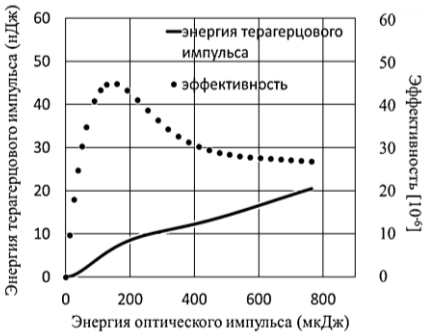


Рис. 2. Зависимость терагерцовой энергии и эффективности преобразования от энергии импульса накачки

Список литературы

1. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Maslov A.V., Hangyo M. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 085346.
2. Tu C.M., Ku S.A. et/ al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. P. 093110.
3. Löffler T., Hahn T., Thomson M., Jacob F., Roskos H.G. // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 5353.
4. Blanchard F., Razzari L. et. al. // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 13212.
5. Ku S.A., Tu C.M. et. al. // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 13930.
6. Vidal S., Degert J., Tondusson M., Freysz E., Oberle J. // J. Opt. Soc. Am. 2014. V. 31. P. 149.
7. Bakunov M.I., Maslov A.V., Tsarev M.V. // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. P. 063817.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. НИКОЛАЕВ[1,3], А.А. МАМРАШЕВ[1],
Ю.М. АНДРЕЕВ[3,4], Г.В. ЛАНСКИЙ[3]
[1]*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*
[2]*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск*
[3]*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск*
[5]*Томский государственный университет*

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА ТРИБОРАТА ВИСМУТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Разработка эффективных источников терагерцового излучения привлекает большое внимание исследователей благодаря особым свойствам и перспективам применения данного излучения. Неотъемлемой частью генераторов, основанных на принципах нелинейной оптики, являются высококачественные кристаллы. В данной работе исследованы терагерцовые оптические свойства трибората висмута – нелинейного кристалла, хорошо зарекомендовавшего себя в качестве генератора суммарных и разностных частот, а также параметрического преобразователя фемтосекундного излучения в ИК диапазон. Предварительно рассчитаны кривые коллинеарного фазового согласования для преобразования частот излучения ИК-лазера в ТГц-область. Обсуждается перспектива использования данного кристалла в качестве генератора ТГц излучения и проводится сравнение с другими популярными нелинейными кристаллами.

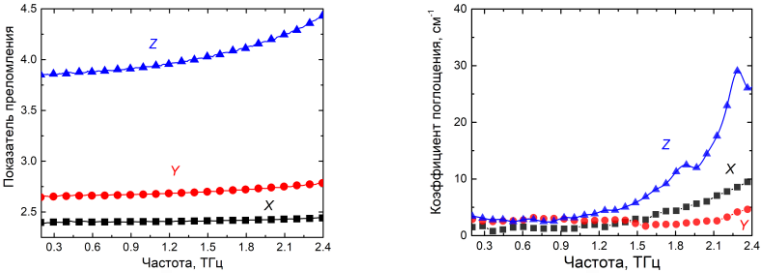
N.A. NIKOLAEV[1,2], A.A. MAMRASHEV[1],
Yu.M. ANDREEV[3,4], G.V. LANSKII[3]
[1]*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*
[2]*Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk*
[3]*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk*
[4]*National Research Tomsk State University*

OPTICAL PROPERTIES OF BISMUTH TORBORATE AND PROSPECTS FOR APPLICATION IN THE THERAHZ RANGE

The development of effective terahertz sources attracts much attention due to the special properties and applications of this radiation. A key element of generators based on the principles of nonlinear optics is high-quality crystal. In this paper, we study terahertz optical properties of bismuth triborate, a nonlinear crystal that is used for sum and difference frequencies generation, as well as a parametric converter of femtosecond radiation into the IR-range. The collinear phase matching curves were preliminarily

simulated for frequencies conversion of the IR lasers into the THz spectral range. The prospect of using the crystal as a THz generator is discussed and a comparison is made with other popular nonlinear crystals.

Показатель преломления и коэффициенты поглощения трёх оптических осей кристалла BIBO были исследованы в диапазоне 0,2 - 2,4 ТГц (рис. 1). Его спектр поглощения не имеет сильных линий ниже 2,4 ТГц по сравнению с такими кристаллами как KTP, LBO и β-BBO. В диапазоне < 2 ТГц коэффициенты поглощения составляют менее 20 см$^{-1}$ (α_z) и 10 (α_y, α_x) см$^{-1}$. Показатель преломления демонстрирует большое двулучепреломление: $n_x \sim 2{,}6$, $n_y \sim 3$, $n_z \sim 4{,}2$. Дисперсия показателей преломления аппроксимирована в форме уравнений Селмейера, на основе которых рассчитаны кривые коллинеарного фазового согласования для преобразования частот ИК-лазера в ТГц-область. В результате показана возможность реализации s-fs и f-fs типов преобразования в принципиальной плоскости *XZ*. Здесь s – медленная волна, f – быстрая волна, а первый символ относится к ТГц излучению.



а б

Рис. 1. Показатель преломления (а) и коэффициенты поглощения (б) BIBO

Комбинация оптических свойств кристалла BIBO в видимом и ТГц диапазонах определяет его перспективы как эффективного терагерцового источника. Он обладает заметно меньшим поглощением в ТГц спектральном диапазоне, чем другие популярные кислородосодержащие нелинейные кристаллы, высоким порогом разрушения и превосходит кристаллы семейства боратов значениями нелинейных коэффициентов [1].

Список литературы

1. Nikogosyan D.N. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey. New York: Springer-Verlag, 2005.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. АМАНОВА, В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ, А.В. МАКАРЕВИЧ, В.Н. НАВНЫКО

Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь

ИЗУЧЕНИЕ ВКЛАДОВ ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, ФОТОУПРУГОСТИ И ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ДИФРАКЦИОННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОЛОГРАММ, СФОРМИРОВАННЫХ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $Bi_{12}SiO_{20}$

Представлены результаты теоретических исследований зависимости дифракционной эффективности η голограмм, сформированных в кристалле BSO толщины 8 мм от ориентационного угла θ и значения удельного вращения ρ кристалла. Показано, что влияние обратного пьезоэлектрического эффекта, фотоупругости и оптической активности качественно изменяет ориентационные и поляризационные зависимости дифракционной эффективности голограмм, записанных в кубических фоторефрактивных кристаллах.

M.A. AMANOVA, V.V. SHEPELEVICH, A.V. MAKAREVICH, V.N. NAUNYKA

[1]*Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus*

STUDY OF THE CONTRIBUTIONS OF THE REVERSE PIEZOELECTRIC EFFECT, PHOTOELASTICITY AND OPTICAL ACTIVITY ON THE DIFFRACTION EFFICIENCY OF HOLOGRAMS, FORMED IN THE PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL $Bi_{12}SiO_{20}$

The results of theoretical studies of the dependence of the diffraction efficiency η of holograms formed in 8 mm thick BSO crystal on the orientation angle θ and the specific rotation ρ of the crystal are presented. It is shown that the influence of the inverse piezoelectric effect, photoelasticity, and optical activity qualitatively changes the orientation and polarization dependences of the diffraction efficiency of holograms recorded in cubic photorefractive crystals.

Полученные результаты теоретического анализа без учета и с учетом обратного пьезоэлекрического эффекта при вариациях удельного вращения плоскости поляризации световых пучков в диапазоне от 0 до 405 рад/м для азимутов линейной поляризации взаимодействующих в

кристалле световых пучков $\Psi_0 = 45°$ представлены на рис. 1. При расчетах использованы следующие параметры кристалла BSO: пьезоэлектрический коэффициент $e_{14} = 1.12\,\text{Кл}/\text{м}^2$; электрооптический коэффициент $r_{41} = -5\,\text{пм}/\text{В}$; показатель преломления $n = 2.54$; коэффициенты упругости $c_1 = 12.96\times10^{10}\,\text{Н}/\text{м}^2$, $c_2 = 2.99\times10^{10}\,\text{Н}/\text{м}^2$, $c_3 = 2.45\times10^{10}\,\text{Н}/\text{м}^2$; фотоупругие постоянные $p_1 = -0.16$, $p_2 = -0.13$, $p_3 = -0.12$, $p_4 = -0.015$ [1]. Амплитуда напряженности электрического поля пространственного заряда E_{SC} выбиралась равной $5\times10^4\,\text{В}/\text{м}$ также в соответствии с [1].

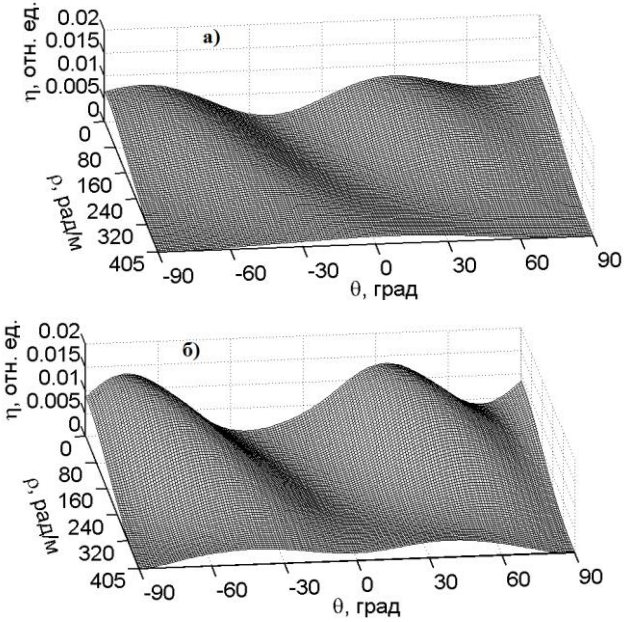


Рис. 1. Зависимости дифракционной эффективности η голограмм, сформированных в кристалле BSO толщины 8 мм от ориентационного угла θ и значения удельного вращения ρ кристалла

Список литературы

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. // Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.

УДК 535(06)+004(06)

К.Н. БОЛДЫРЕВ[1,2], Е. СУЛЕЙМЕН[1,2], М.Н. ПОПОВА[1]
[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

АНТИПЕРЕСЕЧЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ УРОВНЕЙ В СПЕКТРАХ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В $LiYF_4:Ho^{3+}$

Было проведено исследование кристаллов двойных фторидов лития-иттрия, легированных гольмием, с помощью широкодиапазонной люминесцентной спектроскопии высокого разрешения. Впервые в спектрах люминесценции были разрешены сверхтонкие и изотопические структуры электронных переходов. Сообщается о первом наблюдении антипересечения сверхтонких уровней в спектрах люминесценции кристаллов.

K.N. BOLDYREV[1,2], E. SULEIMEN[1,2], M.N. POPOVA[1]
[1]*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

ANTICROSSING OF HYPERFINE LEVELS IN THE LUMINESCENCE SPECTRA IN $LiYF_4:Ho^{3+}$

The study of lithium-yttrium fluoride crystals doped with rare-earth ion holmium using broad-band high-resolution spectroscopy was carried out. Hyperfine and isotopic structures were first resolved in the luminescence spectra. The first observation of anticrossing of hyperfine levels in the luminescence spectra in a crystal is reported.

Активированный редкоземельным ионом кристалл $LiYF_4:Ho^{3+}$ является хорошо известной модельной системой в теоретической физике твердого тела, который широко используется в качестве лазерного материала, находит применения в датчиках и квантовой электронике. В последнее время, данное соединение привлекает внимание из-за возможности построения на его основе элементов для квантовой памяти. Антипересечение (расталкивание) уровней возникает не только в атомных системах, оно проявляется и при изучении спектров молекул, свойств атомных ядер и элементарных частиц. В данной работе мы сообщаем о первом непосредственном наблюдении антипересечения сверхтонких уровней в кристалле двойного фторида лития-иттрия в спектрах люминесценции.

Эффект наблюдался в спектре $LiYF_4:Ho^{3+}$ во внешнем магнитном поле. В работе измерены низкотемпературные (5 К) спектры поглощения (в диапазоне энергий 2000 - 25000 см$^{-1}$ с разрешением до 0.001 см$^{-1}$) монокристалла $LiYF_4:Ho^{3+}$ (0.1 ат.%) в магнитном поле (до 180 мТл) [1, 2]. Спектры были сняты с помощью фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS 125HR и криостата замкнутого цикла CryoMech ST403. В точках пересечения электронно-ядерных уровней с $\Delta m = 2$ и $\Delta m = 0$ (m проекция ядерного спина $I_{Ho} = 7/2$), наблюдались разрывы 0.01 - 0.06 см$^{-1}$. Было показано, что антипересечения с $\Delta m = 2$ обусловлены смешиванием волновых функций дублета Γ_{34} основного состояния $^5I_8$ и синглета Γ_2 первого возбужденного состояния $^5I_7$. Результаты могут быть использованы при построении эффективной оптической квантовой памяти. Антипересечения при $\Delta m = 0$ связаны со случайными деформациями кристаллической решетки и этот эффект может использоваться как очень чувствительный метод контроля качества кристаллов. Также в данной работе проведено моделирование электромагнитной ячейки с использованием программы COMSOL Multiphysics. Ячейка позволила провести спектроскопические исследования в геометриях Фарадея и Фойгта с высокой однородностью магнитного поля. На основе расчетов были подобраны формы концентраторов магнитного поля и проведена опытно-конструкторская работа, что позволило провести исследования во внешних магнитных полях до 1 Тл.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) ИСАН «Мультифункциональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения» (УНУ МШСВР ИСАН) в рамках проекта в рамках грата РНФ № 19-72-10132.

Список литературы

1. Popova M.N., Boldyrev K.N. High-resolution spectra of LiYF4:Ho3+ in a magnetic field // Optical Materials. 2017. V. 63. P. 101.

2. Boldyrev K.N., Popova M.N., Malkin B.Z., Abishev N.M. Direct observation of hyperfine level anticrossings in the optical spectra of a $LiYF_4:Ho^{3+}$ single crystal // Phys. Rev. B Rapid. Comm. 2019. V. 99. P. 041105(R).

3. Giraud R., Wernsdorfer W., Tkachuk A.M, Mailly D., Barbara D. Nuclear Spin Driven Quantum Relaxation in $LiY_{0.998}Ho_{0.002}F_4$ // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 057203.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. МИСЬКЕВИЧ[1,2], А.В. ПОДКОПАЕВ[2]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[2]*Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск*

ВЛИЯНИЕ БУФЕРНЫХ ГАЗОВ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ Ar-Xe-$C_2HBrClF_3$ И Ne-Xe-$C_2HBrClF_3$ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА

Приводятся результаты исследования влияния буферных газов Ne и Ar на спектральные характеристики люминесценции газовой смеси Xe-$C_2HBrClF_3$. В исследуемой активной среде одновременно образуется три эксимерных молекулы XeBr*, XeCl* и XeF*. Возбуждение производилось осколками деления ^{235}U, источником нейтронов для реакции деления служит импульсный быстрый реактор БАРС-6. Были установлены зависимости интенсивностей основных спектральных полос эксимерных молекул и линий других компонент смеси от давления буферных газов в пределах от 0.2 до 4 атм.

A.I. MIS'KEVICH[1,2], A.V. PODKOPAEV[2]
[1]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[2]*Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk*

BUFFER GAS EFFECT ON SPECTRAL CHARACTERISTIC OF LUMINESCENCE IN Ar-Xe- $C_2HBrClF_3$ AND Ne-Xe- $C_2HBrClF_3$ GAS MIXTURES WITH URANIUM FISSION FRAGMENTS EXCITATION

The results of experimental research of Ne and Ar buffer gas effect on spectral characteristic of luminescence in Xe-$C_2HBrClF_3$ gas mixture. There are three excimer molecule XeBr*, XeCl* and XeF* that produces in that kind of active media simultaneously. We use ^{235}U fission fragments initiated by neutrons from fast nuclear pulse reactor BARS-6 for excitation. We receive dependences of the main excimer spectral bands and other active media components spectral lines intensity from buffer gas pressure from 0.2 to 4 atm area.

Одним из способов накачки плотных газовых активных сред для создания эксимерных молекул является возбуждение высокоэнергетическими продуктами ядерных реакций [1]. Высокая эффективность люминесценции в УФ диапазоне длин волн таких эксимеров как XeBr* позволяет использовать их для прямого

преобразования энергии ядерных реакций в световую [2]. Для эксимерных молекул такого типа важным фактором является давление молекулы донора галогена и ее тип [3]. В данной работе в качестве донора атомов галогена была использована молекула фторотана $C_2HBrClF_3$, позволяющая получить одновременно три эксимерных молекулы XeBr*, XeCl* и XeF*[4].

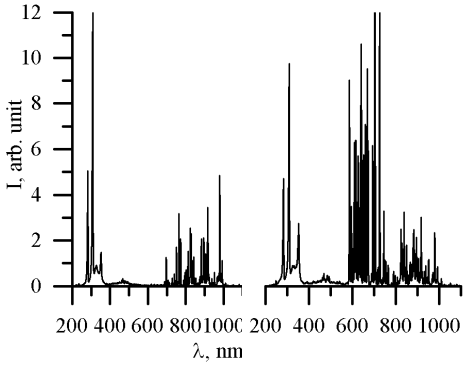


Рис. 1. Спектры люминесценции газовой смеси Xe-$C_2HBeClF_3$ с буферным газом Ar(слева) и Ne(справа), давление 1 атм

Одним из путей повышение эффективности передачи энергии от осколков деления урана к активной среде является подбор и оптимизация буферного газа. Данная работа посвящена исследованию влияния Ne и Ar на спектральные характеристики активной газовой среды на основе смеси Xe-$C_2HBrClF_3$. На рис. 1, представлены спектры люминесценции газовых смесей Ar-Xe-$C_2HBrClF_3$ и Ne-Xe-$C_2HBrClF_3$, возбуждаемых осколками деления урана.

Список литературы

1. Prelas M. Nuclear-pumped lasers // Nuclear-Pumped Lasers. Springer, Cham, 2016. С. 131-228.

2. Williams W.H., Miley G.H. Nuclear pumped XeBr* fluorescence // Journal of applied physics. 1994. V. 75. №. 4. P. 1900-1908.

3. Lo D. The role of halogen donors in discharge instability of rare-gas halide excimer lasers // Applied Physics B. 1989. V. 49. № 6. P. 535-540.

4. Podkopaev A.V., Mis'kevich A.I. Experimental research of XeBr excimer molecule luminescence in Ar-Xe-$C_2HBrClF_3$ gas mixture with high energy particles excitation // KnE Energy. 2018. P. 130-137.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ОВЕЧЕНКО, А.П. БОЙЧЕНКО, В.А. НИКИТИН
Кубанский государственный университет, Краснодар

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ Al_2O_3 ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЕГО БЕЗЭЛЕКТРОЛИЗНОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

На электролизно-сформированной в дистиллированной воде пленке Al_2O_3 обнаружена ее электролюминесценция в кетонах, как безэлектролизных электролитах. Установлено, что этот процесс сопровождается изменением нанопористой структуры оксида.

D.S. OVECHENKO, A.P. BOYCHENKO, V.A. NIKITIN
Kuban State University, Krasnodar

CHANGE OF Al_2O_3 STRUCTURE AT REGISTRATION ITS NON-ELECTROLYSIS ELECTROLUMINESCENCE

On an Al_2O_3 film electrolyzically formed in distilled water, its electroluminescence was detected in ketones as non-electrolysis electrolits. It was established that this process is accompanied by a change in the nanoporous structure of the oxide.

В 1964 году М.И. Эдельбергом был исследован процесс генерации электролюминесценции (ЭЛ) анодного Al_2O_3 без его дальнейшего роста в безэлектролизном электролите – диэтилфталате [1]. В свете изложенных автором закономерностей нами было обращено внимание на наличие в молекуле названного вещества фрагментов из карбонильных групп (КНГ), обладающих, как известно, высокой электрической полярностью и значительным дипольным моментом (2.7 D), что делает их наиболее вероятными переносчиками электронов. Поскольку сочетание КНГ с различными углеводородными радикалами представляет целый класс органических соединений, относящихся к кетонам, то имеются основания предполагать безэлектролизное возникновение в них ЭЛ при анодной поляризации Al-электрода с Al_2O_3-покрытием, предварительно сформированном в течение 300 s в дистиллированной воде [2]. Настоящая работа посвящена проверке предположения и исследованию возможного изменения структуры оксида в циклогексаноне (Ch), 4-этилпропиофеноне (Epf) и 4-метоксипропиофеноне (Mpf).

ЭЛ была зарегистрирована во всех перечисленных кетонах. Однако, как видно по РЭМ-изображениям Al_2O_3 (рис. 1), ее протекание сопровождается изменением структуры исходной пленки оксида с

преобразованием ее нанопор. Последние полностью отсутствуют после нахождения в Ch.

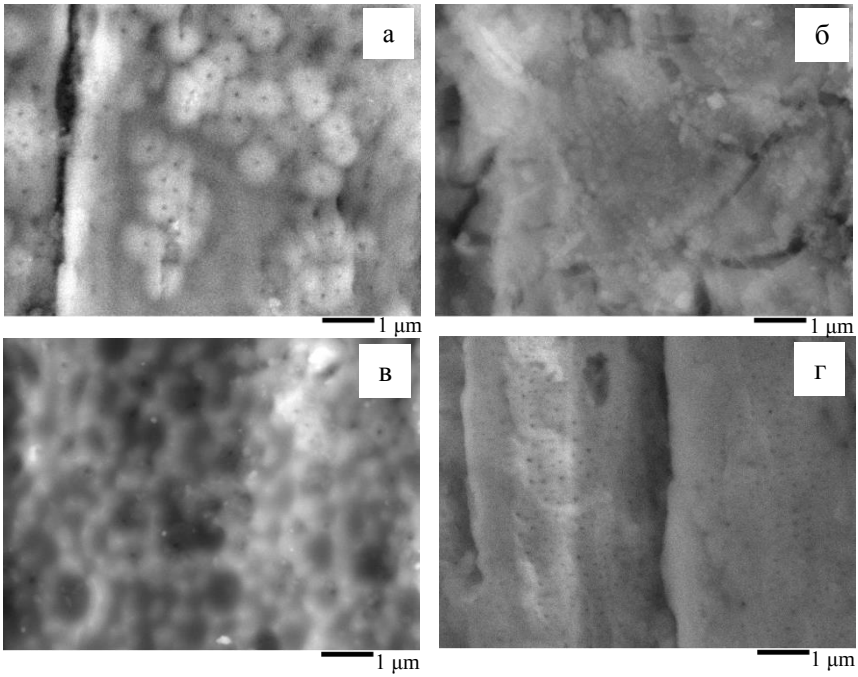


Рис. 1. РЭМ-изображения Al_2O_3: его исходной структуры (а) и после регистрации электролюминесценции в Ch (б), Epf (в) и Mpf (г)

Из полученных данных следует, что хотя процесс генерации ЭЛ на Al_2O_3 и протекает без его дальнейшего роста в кетонах, однако сопровождается преобразованием нанопористой структуры, в частности, зависящей от строения и состава молекул используемого кетона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90112.

Список литературы

1. Эйдельберг М.И. Гальванолюминесценция анодной окисной пленки на алюминии в диэтилфталате // Оптика и спектроскопия. 1964. Т. 17. Вып. 2. С. 244-249.

2. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. Свечение металлов при их анодировании в дистиллированной воде // ПЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 10. С. 31-33.

УДК 535(06)+004(06)

Е.И. КОНСТАНТИНОВА, В.А. СЛЕЖКИН, В.В. БРЮХАНОВ[1]
Калининградский государственный технический университет
[1]Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

КИНЕТИКА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ САМОУПОРЯДОЧЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdZnSeS/ZnS ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ НАНОЧАСТИЦ ОСТРОВКОВОЙ СЕРЕБРЯНОЙ ПЛЕНКИ

В работе спектрально-кинетическими методами исследовалось взаимодействие квантовых точек CdZnSeS/ZnS (КТ) и резонансно-возбужденных наночастиц (НЧ) серебряной островковой пленки в донорно-акцепторном комплексе.

E.I. KONSTANTINOVA, V.A. SLEZHKIN, V.V. BRYUKHANOV[1]
Kaliningrad State Technical University
[1]Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad

LUMINESCENCE KINETICS OF SELF-ORDERED CdZnSeS/ZnS QUANTUM DOTS NEAR RESONANCE-EXCITED NANOPARTICLES OF ISLAND SILVER FILM

The interaction of CdZnSeS/ZnS quantum dots (QDs) and resonance-excited nanoparticles (NPs) of silver island film in donor-acceptor complex was studied by spectral-kinetic methods.

Металлические НЧ различной формы, в том числе в составе упорядоченных массивов, одиночные полупроводниковые КТ, полупроводниковые тонкие пленки широко применяются в лазерной физике, оптоэлектронике и медицине. Взаимодействие экситонных состояний КТ с поверхностным плазмонами в наноструктурированных массивах металлических НЧ приводит к образованию плазмон-экситонной связи [1, 2], что весьма перспективно для различных приложений нелинейной оптики.

В настоящей работе проводится изучение кинетики люминесценции самоупорядоченных КТ CdZnSeS/ZnS вблизи НЧ островковой серебряной пленки, сформированных методом электрохимического осаждения с последующим растворением поверхностного слоя различной толщины [3]. КТ высаживались на поверхность НЧ методом физической сорбцией из толуольного раствора ($C = 3{,}1\cdot10^{-5}$моль/л). Кинетические измерения

проводились на оптической системе Fluorolog (Horiba, Франция) с использованием лазерных диодов NanoLed длиной волны (λ = 331 нм и λ = 405 нм) с частотой повторений импульса 1 MHz.

Математическое моделирование кинетических кривых показало, что лучшую точность (χ_2 = 1,05) дает двухкомпонетная 2D-модель Ферстера [4]:

$$I(t) = A + B_1 \cdot \exp(-t/\tau_1 - 2\gamma\,(t/\tau_1)^{1/2}) + B_2 \exp(-t/\tau_2)\ ,$$

где $\gamma = [A]/C_0$ ([A] – фактическая концентрация акцептора, а C_0 – оптическая концентрация акцептора).

На рис. 1 представлены зависимости параметров моделирования τ_i, B_i и γ от толщины анодного растворения.

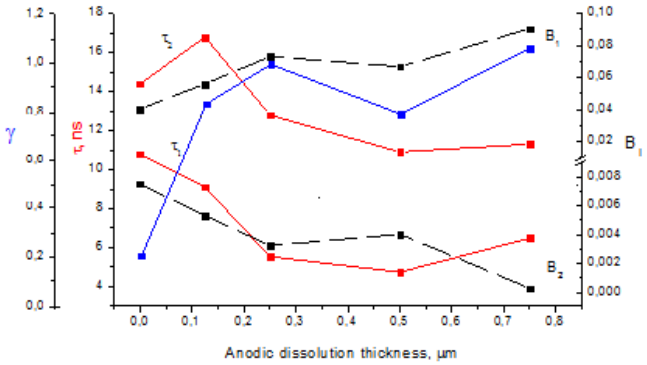


Рис. 1. Параметры моделирование кинетики затухания люминесценции КТ вблизи НЧ островковой серебряной пленки двухкомпонентной 2D-моделью Ферстера

Зависимость временных компонент τ_i и их весов B_i (рис. 1) указывает на наличие безызлучательного переноса фотовозбуждения по механизму LRET. Рост параметра γ свидетельствует о комплексообразование донорно-акцепторного комплекса, что приводит к более эффективному LRET, чем было бы предсказано для случайного распределения доноров и акцепторов (R_0 = 12 нм).

Список литературы

1. Bellessa J., Bonnand C., Plenet J.C., Mugnier J. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 036404.
2. Neogi A. et. al. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 153305.
3. Слежкин В.А., Горлов Р.В. // Известия КГТУ. 2011. № 20. С. 115-122.
4. Sutter J.U., Birch D.J.S., Rolinski O.J. // Meas. Sci. Technol. 2012.V. 23. P. 055103.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. МЕТЛИНА[1], М.Т. МЕТЛИН[1,2], С.А. АМБРОЗЕВИЧ[1,2,3], И.В. ТАЙДАКОВ[1]

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ПИРАЗОЛСОДЕРЖАЩИХ 1,3-ДИКЕТОНАТНЫХ КООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НЕОДИМА(III) ОТ СТЕПЕНИ ФТОРИРОВАННОСТИ ЛИГАНДНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Исследовано влияние степени фторированности лигандного окружения из класса 1,3-дикетонатов на эффективность фотолюминесценции координационных соединений неодима(III). Исследования проводили для четырёх соединений неодима с пиразолсодержащим 1,3-дикетонатным лигандным окружением и различным числом атомов фтора (0, 3, 7 и 13). Установлено, что введение и последующее увеличение числа фторсодержащих концевых групп в лигандной цепи приводит к уменьшению вероятности безызлучательной релаксации возбуждения в ионе неодима.

D.A. METLINA[1], M.T. METLIN[1,2], S.A. AMBROZEVICH[1,2,3], I.V. TAYDAKOV[1]

[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Bauman Moscow State Technical University*
[3]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

THE NONRADIACTIVE RELAXATION PROBABILITY DEPENDENCE FROM THE FLUORINATION CHAIN LENGTH IN PYRAZOLE-CONTAINING 1,3-DICETONATE Nd(III) COORDINATION COMPOUNDS

Influense of the fluorination degree of pyrazole-substituted 1,3-diketone ligands on the luminescence efficiency of Nd(III) coordination compounds was investigated. Based on data obtained for four complexes a consistent decrease of nonradiative relaxation probabilities in Nd(III) with the elongation of fluor-containing chains was revealed.

Координационные соединения ионов неодима(III) обладают большим потенциалом использования в качестве излучающих центров в источниках света для различных применений, поскольку его люминесценция лежит в области 800 - 1600 нм, что соответствует окну прозрачности биологических тканей и оптических волноводов [1].

Для получения эффективной люминесценции координационных соединений лантаноидов необходимо выбирать лиганды таким образом, чтобы обеспечить оптимальную разницу энергий между триплетным уровнем лигандного окружения и излучающим уровнем лантаноида. Замена водородсодержащих колебательных групп в лигандном окружении на менее высокочастотные, например, фторсодержащие группы, позволяет уменьшить тушение люминесценции, возникающее за счет мультифононной релаксации.

В работе показано, что для комплексов наблюдается последовательное увеличение времени излучательной релаксации возбужденного состояния $^4F_{3/2}$ при увеличении числа фторсодержащих групп (рис. 1). На основании рассчитанных в рамках теории Джадда-Офельта собственных времен жизни возбужденного состояния неодима(III) показано, что вероятность безызлучательной релаксации уменьшается с увеличением числа атомов фтора, что приводит к увеличению квантового выхода с 0.25 % (0) до 0.66 % (13).

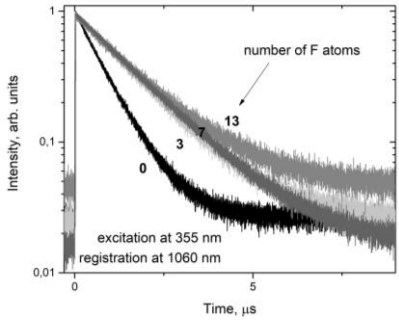


Рис. 1. Кинетические кривые зависимости затухания фотолюминесценции при возбуждении на длине волны 355 нм и регистрации на 1060 нм исследуемых комплексов

Синтетическая часть выполнена при поддержке гранта РНФ №17-72-20088, остальная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-02-00653 а.

Список литературы

1. Bünzli J.-C.G., Piguet C. // Chem. Soc. Rev. 2005. V. 34. P. 1048-1077.
2. Judd B.R. // Physical Review. 1962. V. 127 (3). P. 750-761.
3. Ofelt G.S. // The Journal of Chemical Physics. 1962. V. 37 (3). P. 511-520.

УДК 535(06)+004(06)

П.С. ЧЕРПАК, Г.Ю. ИВАНОВ, И.А. ЛАРИОНОВ,
В.А. ТЫРТЫШНЫЙ[1]
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[1]ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОГРЕВА СИЛОКСАНОВЫХ ПОЛИМЕРОВ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, ВЫХОДЯЩИМ ЧЕРЕЗ БОКОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Приведены результаты экспериментов по определению коэффициента оптического поглощения на разных длинах волн в полисилоксановом полимере, используемом в волоконной оптике. Был исследован процесс термической деградации полимера под воздействием мощного лазерного излучения в различных температурных режимах.

P.S. CHERPAK, G.Yu. IVANOV, I.A. LARIONOV,
V.A. TYRTYSHNYY[1]
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny
[1]IRE-Polus Corporation, Fryazino

HEATING OF SILOXANE POLYMERS BY POWERFUL LASER RADIATION EXITING THROUGH THE SIDE SURFACE OF AN OPTICAL FIBER

The results of experiments on determination of the optical absorption coefficient at different wavelengths in a polysiloxane polymer, used in fiber optics, are presented. The process of thermal degradation as a result of exposure to high-power laser radiation in various temperature conditions was studied.

Для защиты оптических волокон от химических и механических воздействий окружающей среды могут применяться полимерные покрытия на основе силоксанов. Данные полимеры обладают значительным коэффициентом поглощения в области длин волн накачки и генерации волоконных лазеров, по сравнению с плавленым кварцем [1]. Тепловое воздействие мощного лазерного излучения на защитные полимеры может приводить к ухудшению их характеристик вплоть до полной термической деградации, что может ограничивать максимальную

выходную мощность волоконных лазеров. Чаще всего, деградация защитного полимера происходит в местах выхода рассеянной оптической мощности через боковую поверхность волокна. Обычно это наблюдается на сварных стыках разнородных волокон, в области высвечивания оболочечных мод и в местах терминации оптического излучения.

Целью данной работы является определение коэффициента поглощения силоксанового полимера на различных длинах волн, а также оценка температуры деградации в описанных условиях.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Отрезок кварцевого волокна, по которому распространяется лазерное излучение, погружается в исследуемый полимер, залитый внутрь П-образного стеклянного профиля. В качестве источников излучения используются волоконные лазеры с длинами волн генерации 1.06 , 1.55 и 1.94 мкм. Лазерное излучение выходит через боковую поверхность волокна и распространяется через полимер, вызывая его разогрев. Температура в объеме исследуемого полимера измерялась по смещению спектра отражения волоконной брэгговской решетки. Температурное распределение на поверхности полимера определялась с помощью тепловизора.

Для моделирования картины разогрева П-образоного профиля с полимером использовалось численное решение уравнения теплопроводности. Подбор параметров данной модели позволил добиться соответствия с результатами эксперимента и определить коэффициент оптического поглощения полимера на разных длинах волн: $A_{1062\ нм}$ = 0.1 дБ/см, $A_{1550\ нм}$ = 0.6 дБ/см, $A_{1940\ нм}$ = 1.6 дБ/см. Пороговая температура деградация полимера составила 270 °C.

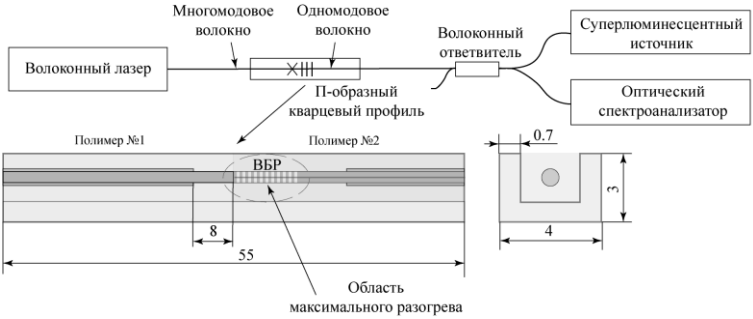


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Ryabushkin O.A., Shaidullin R.I., Zaytsev I.A. // Opt. Lett. 2015. V. 40. P. 1972-1975.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. КОЛЯДИН, А.Ф. КОСОЛАПОВ, И.А. БУФЕТОВ
Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ТЕМПЕРАТУРА ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОЛЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ПРИ ПОРОГОВЫХ УСЛОВИЯХ

Впервые измерена температура плазмы поддерживаемого лазерным излучением оптического разряда в полой сердцевине волоконного световода. Оптический разряд поддерживался излучением импульсно-периодического лазера с пиковой мощностью ~ 1 МВт. Температура разряда определялась по спектру излучения плазмы в двух зонах прозрачности волоконного световода в предположении, что спектр свечения плазмы соответствует спектру черного тела. Показано, что средняя по времени определенная таким образом температура плазмы оптического разряда достигает величины около $15 \cdot 10^3$ K.

A.N. KOLYADIN, A.F. KOSOLAPOV, I.A. BUFETOV
Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow

TEMPERATURE OF THE OPTICAL DISCHARGE IN HOLLOW-CORE OPTICAL FIBERS UNDER THRESHOLD CONDITIONS

The plasma temperature of an optical discharge supported by laser radiation in the hollow core of an optical fiber was measured for the first time. The optical discharge was supported by radiation from a repetitively pulsed laser with a peak power of ~ 1 MW. The discharge temperature was determined from the plasma emission spectrum in two transparency zones of the optical fiber under assumption that the plasma emission spectrum corresponds to the blackbody spectrum. It was shown that the time average temperature of the optical discharge plasma reaches about $15 \cdot 10^3$ K.

Впервые распространение оптического разряда (ОР) в световодах с сердцевиной из кварцевого стекла наблюдалось в 1987 году (см. обзор [1]). Световоды с полой сердцевиной активно исследуются уже больше десяти лет, однако данный эффект в них до сих пор не был исследован.

В настоящей работе исследован спектр свечения ОР в полых револьверных световодах (РС) из кварцевого стекла, заполненных лабораторным воздухом, а также измерена температура плазмы ОР.

Схема эксперимента представлена на рис. 1*а*. Излучение лазера с помощью линзы вводилось в полую сердцевину световода длиной 44 см.

Лазер работал одновременно в режиме модуляции добротности и синхронизации мод. Излучение лазера представляло собой последовательность 130 нс пакетов 100 пс импульсов с частотой следования 76 МГц. Пакеты же следовали с частотой 1200 Гц. Процесс разрушения инициировался с помощью металлической пластины, которая подносилась вплотную к выходному торцу световода (МП на рис. 1*а*). Перед инициированием оптического разряда на выходе световода средняя мощность составляла 2 Вт, что соответствует пиковой мощности 1 МВт. Данная мощность лазерного излучения оказалась достаточна, чтобы ОР возникал, но недостаточна для его распространения по РС.

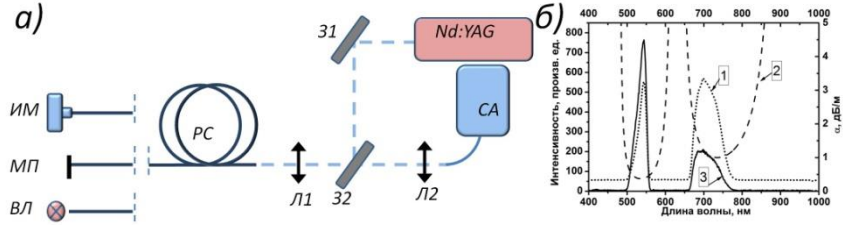


Рис. 1. Схема эксперимента (*а*): РС - револьверный световод, Л1, Л2 - линзы, З1,З2 - зеркала, СА - спектроанализатор, МП - металлическая пластинка для инициирования ОР, ВЛ - калибровочная вольфрамовая лампа, ИМ - измеритель мощности; 1 - спектр ВЛ, 2 - расчетная кривая оптических потерь РС, 3 - спектр ОР (*б*)

Спектр ОР представлен на рис. 1*б*, где линия 3 соответствует спектру ОР, линия 1 – спектру калиброванной вольфрамовой лампы, а линия 2 – расчетным оптическим потерям световода. Из графика видно, что распределение интенсивностей в полосах пропускания для линий 1 и 3 существенно отличаются, что позволяет определить температуру в предположении, что спектр свечения плазмы соответствует спектру черного тела. Если использовать известный в пирометрии метод, основанный на измерении отношения спектральных плотностей сигнала на двух длинах волн, то средняя по времени температура, измеренная таким образом, составит $15 \cdot 10^3$ К.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00324.

Список литературы

1. Kashyap R. // Optics Express. 2013. V. 21. P. 6422.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Э. РИЗАЕВ[1], Д.В. МОКРОУСОВА[1], С.А. САВИНОВ[1],
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ[1], Я.В. ГРУДЦЫН[1], А.В. КОРИБУТ[1],
Д.Е. ШИПИЛО[1,2], Н.А. ПАНОВ[1,2], Ю.А. МИТЯГИН[1],
О.Г. КОСАРЕВА[1,2], А.А. ИОНИН[1]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ В ПЛАЗМЕ ОДНОЦВЕТНОГО ФИЛАМЕНТА

Экспериментально исследовано влияние различных параметров на генерацию терагерцового излучения в плазме, образованной при одноцветной филаментации ИК и УФ импульсов. Показано, что спектры терагерцового излучения зависят от длины волны лазерного излучения и жесткости фокусировки и не зависят от энергии импульса.

G.E. RIZAEV[1], D.V. MOKROUSOVA[1], S.A. SAVINOV[1],
L.V. SELEZNEV[1], Ya.V. GRUDTSYN[1], A.V. KORIBUT[1],
D.E. SHIPILO[1,2], N.A. PANOV[1,2], Yu.A. MITYAGIN[1],
O.G. KOSAREVA[1,2], A.A. IONIN[1]
[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Lomonosov Moscow State University*

TERAHERTZ RADIATION GENERATED IN PLASMA OF SINGLE-COLOR FILAMENT

The influence of various parameters on the generation of terahertz radiation in plasma formed during single-color filamentation of IR and UV pulses is experimentally studied. It is shown that the spectra of terahertz radiation depend on the wavelength of laser radiation and the focusing conditions and do not depend on the pulse energy.

Терагерцовое (ТГц) излучение привлекает к себе широкое внимание в связи с большим количеством возможных применений. Одним из источников такого излучения могут быть плазменные каналы, образующиеся при филаментации ультракоротких лазерных импульсов. В данной работе исследуются особенности генерации ТГц излучения в плазме одноцветных филаментов.

Эксперимент проводился на титан-сапфировой лазерной системе, центральная длина волны основной гармоники которой 744 нм,

длительность импульса около 100 фс. В эксперименте пучок фокусировался линзой, вблизи фокуса наблюдалась филаментация. ТГц излучение, образующееся при этом, коллимировалось с помощью параболического зеркала, фокус которого совмещался с фокусом линзы. Коллимированное ТГц излучение направлялось в интерферометр Майкельсона, а затем регистрировалось болометром. Одно из зеркал интерферометра было подвижным, что давало возможность осуществлять сканирование ТГц импульса и получать его спектр.

Спектры ТГц излучения, полученные при разных энергиях импульса и неизменной фокусировке, изображены на рис. 1. Варьирование энергии в пределах от 1 до 3 мДж мало влияет на спектр, это объясняется тем, что изменение энергии влияет лишь на длину филамента. Гораздо более сильное различие в спектрах наблюдалось при использовании разной фокусировки с неизменной энергией импульса (рис. 2). При более жесткой фокусировке плотность плазмы и интенсивность в филаменте возрастают, в результате чего спектр ТГц излучения становится шире и его максимум смещается в сторону высоких частот. Также в эксперименте были исследованы спектры ТГц излучения при филаментации импульсов третьей гармоники (248 нм).

Таким образом, исследованы характеристики ТГц излучения, генерируемого в плазме одноцветного филамента, и экспериментально продемонстрировано, что на спектр ТГц излучения существенно влияют длина волны лазерного импульса и жесткость фокусировки и не влияет энергия лазерного импульса.

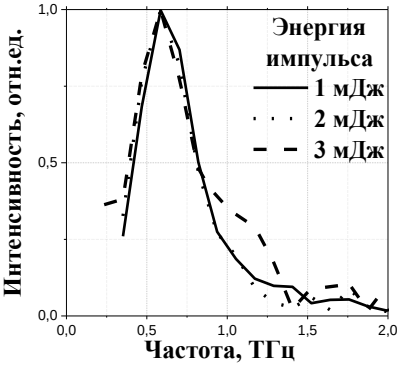


Рис. 1. Спектры ТГц излучения при различной энергии импульса

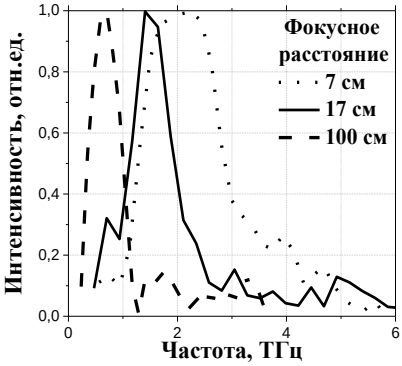


Рис. 2. Спектры ТГц излучения при различной фокусировке

УДК 535(06)+004(06)

И.А. ЮРЛОВ, П.А. РЯБОЧКИНА, С.А. ХРУЩАЛИНА,
А.В. ЕГОРЫШЕВА[1], С.В. ГОЛОДУХИНА[1]
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск
[1]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ZrO_2-Y_2O_3 И CaF_2-ErF_3

В настоящей работе изучались особенности возникновения широкополосного «белого» излучения в наноразмерных диэлектрических частицах CaF_2-ErF_3 и ZrO_2-Er_2O_3, синтезированных методом соосаждения, при их возбуждении лазерным излучением с высокой плотностью мощности в полосы поглощения ионов Er^{3+}.

I.A. YURLOV, P.A. RYABOCHKINA, S.A. KHRUSHCHALINA,
A.V. EGORYSHEVA[1], S.V. GOLODUKHINA[1]
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogareva, Saransk
[1]Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow

FEATURES OF INTERACTION OF LASER RADIATION WITH HIGH POWER DENSITY WITH NANOSIZED ZrO_2-Y_2O_3 AND CaF_2-ErF_3 PARTICLES

In this work, we studied the features of the appearance of broadband “white” radiation in nanosized CaF_2-ErF_3 and ZrO_2-Er_2O_3 nanoparticles synthesized by coprecipitation upon their excitation by laser radiation with a high power density into the absorption bands of Er^{3+} ions.

В настоящее время имеются публикации [1-6], в которых сообщается о возникновении широкополосного излучения в наноразмерных частицах, легированных РЗ ионами, при возбуждении лазерным излучением с высокой плотностью мощности в полосы поглощения данных ионов. Широкополосное излучение наблюдалось в видимом диапазоне спектра и визуально было охарактеризовано как «белое» [1]. Несмотря на значительное количество работ [2-4], посвященных исследованию причин возникновения широкополосного излучения, вопрос о механизме его возникновения остается открытым.

По результатам исследования закономерностей широкополосного «белого» излучения в наноразмерных частицах YPO_4:Er нами был предложен механизм его возникновения [5, 6].

В настоящей работе изучались особенности возникновения и закономерности широкополосного «белого» излучения в наноразмерных диэлектрических частицах CaF_2-ErF_3 и ZrO_2-Er_2O_3.

Данные частицы были синтезированы методом соосождения. Размеры частиц варьировались в интервале 100-120 нм.

В ходе исследований было выявлено, что широкополосное «белое» излучение возникает при возбуждении ZrO_2-10мол.%Er_2O_3 лазерным излучением с диной волны 1532 нм на уровень $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} при значении плотности мощности излучения 263 Вт/см^2.

Малоинтенсивное широкополосное «белое» излучение наблюдается для наночастиц CaF_2-ErF_3 при возбуждении лазерным излучением с диной волны 1532 нм и плотностью мощности лазерного излучения 633 Вт/см^2 только в образцах с концентрацией 25% мол.% ErF_3.

Различия в условиях наблюдения широкополосного «белого» излучения в наноразмерных диэлектрических частицах CaF_2-ErF_3 и ZrO_2-Er_2O_3 могут быть связаны с различными значениями их ширины запрещенной зоны, равными 5 эВ для ZrO_2-Er_2O_3 и 12 эВ для CaF_2-ErF_3, а также наличия кислородных вакансий в ZrO_2-10мол.%Er_2O_3, которые возникают в них из-за гетеровалентного замещения ионами Er^{3+} ионов Zr^{4+}.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-32-90135.

Список литературы

1. Marciniak L., Strek W. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 173113.
2. Redmond S.M., Rand S.C. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 5517.
3. Strek W., Marciniak L. et. al. // Opt. Expr. 2011. V. 19. P. 14084.
4. Redmond S.M., Rand S.C. et. al. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 4069.
5. Khrushalina S.A., Ryabochkina P.A. et. al. // JETP Lett. 2016. V. 103. № 5. P. 342-349.
6. Ryabochkina P.A., Khrushalina S.A. et. al/ // JETP Lett. 2016. V. 103. № 12. P. 836-845.

УДК 535(06)+004(06)

Е.О. ЕПИФАНОВ, А.Г. ШУБНЫЙ, Н.В. МИНАЕВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ЖИДКОСТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЛЕЙКОСАПФИРА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Данная работа посвящена исследованию процесса лазерно-индуцированного обратного жидкостного травления (ЛИЖТ) образцов лейкосапфира в водном растворе соли серебра $AgNO_3$ под высоким давлением. Приведены результаты лазерно-индуцированного микроструктурирования образцов при разных давлениях. Полученные результаты свидетельствуют об значительном увеличении эффективности процесса формирования микроструктур с глубоким рельефом на поверхности образцов лейкосапфира.

E.O. EPIFANOV, A.G. SHUBNIY, N.V. MINAEV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

EFFICIENCY OF LASER-INDUCED BACKSIDE WET MICROSTRUCTURING OF SAPPHIRE INCREASES WITH PRESSURE

This work is devoted to studying the process of laser induced backside wet etching (LIBWE) of sapphire in water solution with silver salt AgNO3 under high pressure. The results of etching at different pressures are presented. This leads to a significant increasing in efficiency of the process of microstructure formation with deep formation of sapphire on surface of samples.

Одной из перспективных технологий обработки оптически прозрачных материалов является технология LIBWE. С ее помощью удается обрабатывать оптически прозрачные, твердые и химически инертные материалы, такие как синтетический сапфир (Al_2O_3). Ключевыми параметрами, влияющими на эффективность травления, являются используемая среда и источник лазерного излучения. В качестве сильно поглощающей среды для лазерного излучения с распространенной длиной волны 532 нм было предложено использование водного раствора $AgNO_3$. Нежелательным побочным эффектом в такой конфигурации является неизбежное образование парогазовых пузырьков в области воздействия. Они препятствуют притоку рабочего вещества в область воздействия, в

результате чего понижается эффективность травления и накладываются ограничения на создание каналов с высоким аспектным соотношением.

Предложенный способ улучшения технологии LIBWE состоит в том, что давление в рабочей среде повышается, в результате чего парогазовые пузырьки уменьшаются в размерах, а приток вещества в труднодоступные области усиливается. Было показано что, эффективность процесса LIBWE при увеличении давления в рабочей среде с 1 до 250 атм повышается в 2 раза [1]. Схема установки приведена на рис. 1. Источником излучения служил лазер 527 нм наносекундной длительности импульса на частоте 1 кГц (4). Ячейка высокого давления (1) представляла собой толстостенный металлический реактор с двумя сапфировыми окнами на одном из которых проводилось травление, а через другое осуществлялась визуализация процесса. Ячейка закреплялась на высокоточном трёхкоординатном моторизированном столе (5). Излучение фокусировалось на обратную сторону сапфирового стекла (2) F-thetha объективом (3). Давление в ячейке нагнеталось ручным прессом и контролировалось датчиком. Шаг по давлению в эксперименте составил 50 атм. Максимально достигнутое давление – 250 атм. Фотографии процесса травления приведены на рис. 2.

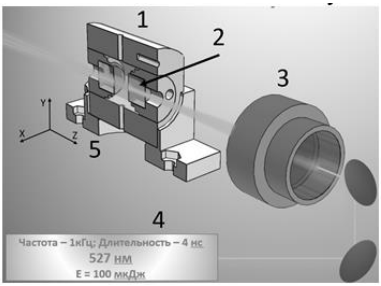


Рис. 1. Схема установки

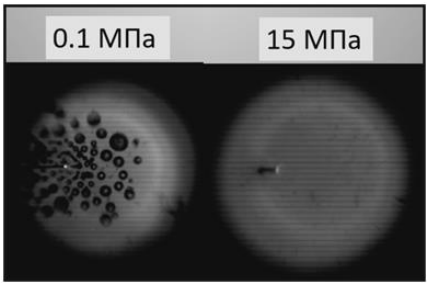


Рис. 2. Фотографии процесса травления

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных информационных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ 18-29-06056 в части сверхкритических флюидных технологий.

Список литературы

1. Shubny A.G. et. al. Efficiency of laser-induced backside wet microstructuring of sapphire increases with pressure // Laser Phys. Lett. 2019. V. 16. № 8. P. 086001.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. МАКИН[1,2], Р.С. МАКИН[3], Е.И. ЛОГАЧЕВА[1]
[1]*Институт ядерной энергетики СПбПУ, Сосновый Бор*
[2]*Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения - филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург*
[3]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

УПОРЯДОЧЕННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УКИ УФ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИЭЛЕКТРИКАМИ И УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПОЛЯРИТОННАЯ МОДЕЛЬ

Проведен анализ экспериментов по пороговому разрушению поверхности (0001) ZnO излучением KrF лазера. Показано, что экспериментальные данные хорошо объясняются на основе универсальной поляритонной модели (УПМ) и нелинейной математической модели образования пространственных периодов структур.

V.S. MAKIN[1,2], R.S. MAKIN[3], E.I. LOGACHEVA[1]
[1]*Institute for Nuclear Energetic, Sosnovy Bor, Leningrad region*
[2]*Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes - Branch of JSC «Kometa Corporation», Saint-Petersburg*
[3]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

DESTRUCTION AND ORDERED NANOSTRUCTURES PRODUCTION UNDER THE INTERACTION OF ULTRASHORT PULSES OF UV LASER RADIATION WITH DIELECTRICS AND UNIVERSAL POLARITON MODEL

The analysis of experiments on the basis of universal polariton model (UPM) and nonlinear mathematical model of formation of spatial periods of structures is carried out and it is shown that experiments are well explained on the basis of UPM.

В работах [1, 2] проводилось облучение поверхности (0001) ZnO серией импульсов ($N \sim 10^4$) линейно поляризованного излучения УКИ KrF лазера ($\tau = 450$ фс, $\nu = (1 \div 10)$ Гц, $\lambda = 248$ нм). Плотность энергии излучения Q была выше моттовской, отвечающей фазовому переходу полупроводник-металл, но не превышала порог лазерной абляции ($Q \approx 115$ мДж/см^2).

Предлагаемое объяснение экспериментальным результатам основано на УПМ лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред.

Монокристаллический ZnO обладает небольшой шириной запрещенной зоны, и лазерное излучение (ЛИ) ($\lambda = 248$ нм) при прямых зона-зонных переходах, обеспечивает высокие концентрации неравновесных носителей и условия для существования на границе раздела с воздухом поверхностных плазмон поляритонов (ППП), локализованных ППП (ЛППП) и поверхностных плазмонов (ПП). При низких $Q \leq 11$ мДж/см^2 возможно локальное увеличение поглощения полупроводника на различного рода несовершенствах кристаллической структуры, образование локализованных ПП и локальное разрушение поверхностного слоя кристалла (образование наноотверстий диаметром 60 нм << λ), что объясняет хаотичный характер их распределения (рис. 1a).

При $Q \geq 20$ мДж/см^2 формируются наномасштабные решетки разрушения по границам кристаллитов, образование которых связано с распространением вдоль границ пространственных гармоник канальных ППП, ориентация которых $G \perp E$, а период дается формулой $D = \lambda/(2k\xi)$. Для $k = 4$ и $k = 2$ имеем периоды $D = 30$ нм и $D = 60$ нм, что хорошо коррелирует с экспериментами. При сильном несовпадении вектора тангенциальной компоненты E_t лазерного излучения с направлением границы раздела наблюдается зигзагообразное распространение локализованного ППП и образование зигзагообразной решетки структур (рис. 1b и c). Образование решеток $g \parallel E$ при $Q \geq 40$ мДж/см^2 обусловлено интерференцией падающего излучения и ППП, $d = \lambda/\eta \approx 200 - 230$ нм, и в некоторых случаях с удвоенным периодом $d \leq 2\lambda/\eta$. Образование ортогональных решеток $G \perp E$ с периодом $D = \lambda/\zeta$ обусловлено интерференцией клиновых ППП, волноведомых выступом решетки **g**, с возбуждающей их падающей волной ЛИ. Образуются две ортогональные решетки, в пределах одной ячейки которых образуется сглаженный выступ рельефа (рис. 1d).

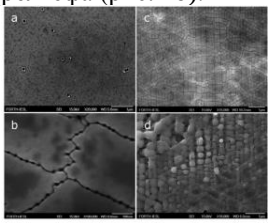


Рис. 1. Полученные с использованием эмиссионного сканирующего электронного микроскопа для тонкого анализа поверхности изображения облученного монокристалла (0001) ZnO ($\lambda = 248$ нм, $\tau = 450$ фс) при плотностях энергии 10 мДж/см^2 (a), 20 мДж/см^2 (b и c), 40 мДж/см^2 (d), соответствующих дозам облучения 2.5 Дж/см^2 (a) и 10^2 Дж/см^2 (b-d) [2]

Список литературы

1. Muzeur L., Michel J.-P. et. al. // J. Optical Society of America. 2010. V. 27(3). P. 531.
2. Muzeur L., Manousaki A. et. al. // J. Applied Physics. 2011. V. 110. P. 124310.
3. Макин В.С. и др. Нелинейность в современном естествознании. М.: Изд-во ЛКИ, 2009.

УДК 535(06)+004(06)

А.Г. ШУБНЫЙ, Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ,
А.О. РЫБАЛТОВКИЙ, О.П. ПАРЕНАГО[1]
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк
[1]Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ МИШЕНИ ПАЛЛАДИЯ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ ВПЛАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ В МЕЗОПОРИСТЫЙ ПОРОШОК Al_2O_3

Предлагается новый подход к получению мезопористых порошков Al_2O_3 с внедренными наночастицами благородных металлов для каталитической химии. В работе используется метод лазерной абляции массивной металлической мишени в среде сверхкритического диоксида углерода (скCO_2). Приводится оценка полученного композита в качестве катализатора жидкофазного гидрирования тройной связи молекулы дефинилацетилена.

A.G. SHUBNYY, E.O. EPIFANOV, N.V. MINAEV,
A.O. RYBALTOVSKY, O.P. PARENAGO[1]
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk
[1]A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, Moscow

LASER ABLATION OF PALLADIUM TARGET IN SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE MEDIA FOLLOWED BY LASER MELTING OF NANOPARTICLES INTO THE MESOPOROUS Al_2O_3 POWDER

A new approach is proposed for the preparation of mesoporous Al_2O_3 powders with embedded noble metal nanoparticles for catalytic chemistry. The method of laser ablation of a massive metal target in supercritical carbon dioxide medium (scCO2) is used. The obtained composite was tested as a catalyst for the liquid-phase hydrogenation of a definylacetylene molecule triple bond.

Предлагается новый подход к получению мезопористых порошков Al_2O_3 с внедренными наночастицами благородных металлов для каталитической химии [1]. В работе используется метод лазерной абляции массивной мишени в среде сверхкритического диоксида углерода (скCO_2). В качестве носителя металлических наночастиц использовали мезопористый порошок Al_2O_3 с характерным размером частиц от 250 до

500 мкм, в качестве мишени – пластинка палладия Pd. Экспериментальная система позволяет осуществлять одностадийный процесс абляции твердых металлических мишеней благородных металлов с последующим внедрением их наночастиц в мезопористые порошки, такие как Al_2O_3.

Первоначальная высокая концентрация наночастиц Pd нарабатывается при лазерной абляции металлической мишени. Мезопористый порошок Al_2O_3 находится на дне реактора высокого давления. В процессе абляции магнитная мешалка может приводиться в движение и таким образом распределять порошок по всему объему реактора. Попадая в лазерный луч образованные наночастицы Pd могут вплавляться в частицы порошка Al_2O_3. Гибкая настройка параметров системы дает возможность регулировать характеристики конечного продукта, а используемая среда скCO_2 способствует быстрому протеканию реакций. На рис. 1 приведены фотографии порошка Al_2O_3 до и после внедрения наночастиц Pd. На рис. 2 приведены данные электронной микроскопии и EDX анализа полученного материала.

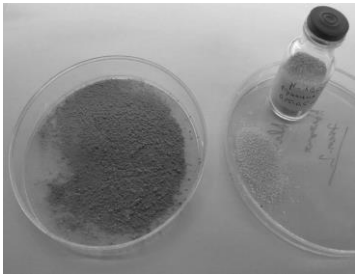


Рис. 1. Фотографии порошка до(справа) и после(слева) обработки в ск-CO_2

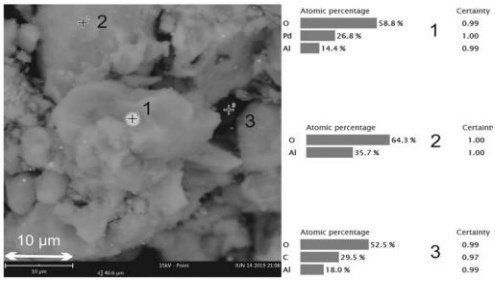


Рис. 2. Результаты элементного анализа налета порошка Al2O3 с наночастицами Pd, полученные с помощью EDX анализа

Работа финансово поддержана РФФИ грант № 18-29-06032 в части синтеза каталитических материалов в сверхкритических средах, а также Министерством науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных и сверхкритических технологий формирования нанокомпозитных материалов.

Список литературы

1. Epifanov E.O., Shubnyi A.G., Minayev N.V., Rybaltovskiy A.O., Yusupov V.I., Parenago O.P. Synthesis of heterogeneous catalysts by laser ablationof metallic palladium with deposition on alumina in supercritical carbon dioxide // Supercritical fluids theory and practice. 2019.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. КАЛИННИКОВ, А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

СИНТЕЗ ЗОЛОТЫХ И СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПЛАЗМОН-УСИЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ КРАСИТЕЛЕЙ

В ходе данного исследования были синтезированы наночастицы серебра и золота методом фемтосекундной лазерной абляции в жидкости. Была получена статистика распределения размера наночастиц в зависимости от энергии лазерного импульса. Выполнено исследование спектров плазмонного поглощения наночастиц. Подобраны оптимальные параметры лазерной абляции для получения наночастиц, обладающих наибольшей интенсивностью плазмонного поглощения. Показана перспективность полученных результатов для использования в исследованиях плазмон-усиленной флуоресценции красителей.

D.S. KALINNIKOV, A.Yu. ZYUBIN, I.G. SAMUSEV
Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad

SYNTHESIS OF GOLD AND SILVER NANOPARTICLES BY FEMTOSECOND LASER ABLATION FOR PLASMON-ENHANCED FLUORESCENCE OF DYES

In the course of these researches silver and gold nanoparticles were synthesized by femtosecond laser ablation in liquid. Statistics of the size of nanoparticles distribution from the energy of the laser pulse were obtained. A study of the plasmon absorption spectra of nanoparticles was researched. The optimal parameters of laser ablation were selected to obtain nanoparticles with the highest plasmon absorption intensity. The prospects of the results for use in plasmon-enhanced fluorescence dye studies have been shown.

Целью данной работы являлась отработка методики контролируемого получения наночастиц благородных металлов методом фемтосекундной лазерной абляции в жидкости, исследование спектров поглощения полученных наночастиц в зависимости от характеристик лазерного импульса и размеров самих частиц.

Наночастицы были получены методом лазерной абляции пластин соответствующих металлов (чистота серебра и золота 999,99 %) в дистиллированной воде. Абляция производилась с помощью

фемтосекундного лазера с компрессором марки TETA-X (TETA Yb amplifier system) фирмы AVESTA (длительность импульса $\tau = 280$ фс, с компрессором $\tau = 30$ фс), энергией накачки $W = 300$ мкДж (рис. 1). Частоту повторения, количество импульсов и мощность лазерного луча задавали внешним генератором. После абляции раствор приобретал характерный цвет: для золота – темно-розовый, для серебра – темно-желтый.

Для определения размера наночастиц использовался спектрометр динамического и статистического рассеяния света photocor complex. В методе динамического рассеяния света размер наночастиц определяется в ходе анализа его временной корреляционной функции. Сначала был найден коэффициент диффузии путем анализа корреляционной функции флуктуаций интенсивности рассеянного света. Затем через коэффициент диффузии рассчитывался радиус наночастиц по формуле Стокса-Эйнштейна. Спектр поглощения наночастиц исследовался на спектрофотометре Shimadzu UV-2600. Полученные спектры сравнивались в зависимости от параметров аблирования наночастиц (таблица 1).

Рис. 1. Фемтосекундный лазер фирмы AVESTA

Таблица 1. Распределения размеров наночастиц в зависимости от мощности лазерного импульса

№ п/п	Серебро		Золото	
	E (мкДж)	D(нм)	E(мкДж)	D(нм)
1	4	-	4	70
2	8	37	8	63
3	12,5	44	13	49
4	18	51	18	54
5	23	63	23	-
6	50	70	50	-

Список литературы

1. Савкин А.Н., Сидоровнина Т.Ю., Тимошенко В.А., Голубенко Ю.В. Импульсная лазерная абляция в жидкости фемто- и наносекундными источниками. Особенности процесса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. Вып. 10.

2. Казакевич П.В., Симакин А.В., Шафеев Г.А. Образование периодических структур при лазерной абляции металлических мишеней в жидкости // Квантовая электроника. 2005. Т. 35(9). С. 831-834.

3. Воронов В.В., Казакевич П.В., Симакин А.В., Шафеев Г.А. Внутренняя сегрегация наночастиц при лазерном облучении // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80(11). С. 811-813.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА В КРИСТАЛЛЕ $BaGa_2GeSe_6$

Экспериментально исследована генерация суммарных частот излучения CO лазера при температурной перестройке фазового синхронизма в новом нелинейном кристалле $BaGa_2GeSe_6$. Оценена скорость изменения угла фазового синхронизма от температуры.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV,
A.A. KOTKOV, A.Yu. KOZLOV, A.M. SAGITOVA, D.V. SINITSYN
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

TEMPERATURE PHASE-MATCHING TUNING IN $BaGa_2GeSe_6$ CRYSTAL

Sum-frequency generation of CO laser radiation in a new nonlinear crystal $BaGa_2GeSe_6$ was experimentally studied at temperature phase-matching tuning. The rate of the phase-matching angle change from temperature was estimated.

Для решения ряда научных и прикладных задач, таких как газовый анализ, лазерная химия, медицина, большой интерес представляет разработка источников лазерного излучения в среднем ИК-диапазоне. Например, лазерное дистанционное зондирование многокомпонентных газовых смесей требует наличия широкополосного излучения в среднем ИК-диапазоне с большим числом ярких узких спектральных линий. Одним из источников такого излучения является CO лазер. Многочастотный CO лазер в режиме модуляции добротности резонатора может излучать более 200 линий одновременно [1]. Кроме того, возможно значительно расширить и обогатить спектр лазера за счёт преобразования его излучения в нелинейных кристаллах [2, 3]. В работе [3] приводятся результаты по внутрирезонаторному преобразованию излучения CO лазера в нелинейном кристалле $BaGa_2GeSe_6$ (BGGSe). Данная схема позволяет получить генерацию суммарных частот (ГСЧ) внутри резонатора CO лазера, однако изменять угол фазового синхронизма (ФС) за счёт поворота кристалла оказалось невозможным. Поскольку кристалл

не был просветлён, изменение угла между осью резонатора и нормалью к поверхности кристалла приводили к дополнительным потерям.

Одним из способов управления ФС в кристалле при внутрирезонаторной схеме преобразования является изменение температуры кристалла. Поэтому в данной работе экспериментально исследуется влияние температуры на ФС в кристалле BGGSe.

Спектр излучения СО лазера насчитывал 58 линий в интервале длин волн 4.9 - 6.0 мкм с максимумом мощности вблизи длины волны 5.3 мкм. Излучение лазера фокусировалось на кристалл BGGSe толщиной 4.7 мм. В ходе эксперимента температура кристалла изменялась с помощью термостата на элементах Пельтье от комнатной (~ 23 °C) до 168 °C.

На рис. 1 показаны спектры излучения ГСЧ, полученные в кристалле BGGSe при различных температурах. Нагрев кристалла привёл к небольшому смещению спектра ГСЧ в коротковолновую область. Исходя из полученных результатов, оценена скорость изменения угла ФС от температуры $d\theta_{pm}/dt = +0.003$ град./°C для излучения с длиной волны $\lambda \sim 5.2$ мкм. Отметим, что для излучения с длиной волны $\lambda = 8.073$ мкм она составляла +0.012 град./°C [4].

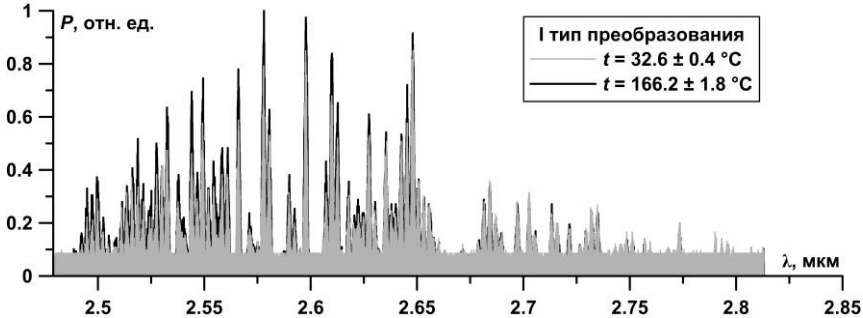


Рис. 1. Спектры излучения суммарных частот, полученные в кристалле BGGSe при различных температурах

Исследование было поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10619). Выражаем искреннюю благодарность В.В. Бадикову и Д.В. Бадикову за предоставление нелинейного кристалла.

Список литературы

1. Puerta J., Herrmann W. et. al. // Appl. Phys. 1979. V. 19 (4). P. 439-440.
2. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O. et. al. // Opt. Lett. 2018. V. 43 (13). P. 3184-3187.
3. Ionin A.A., Badikov D.V. et. al. // Opt. Lett. 2018. V. 43 (18). P. 4358-4361.
4. Kato K., Miyata K. et. al. // Appl. Opt. 2018. V. 57 (26). P.7440-7443.

УДК 535(06)+004(06)

Г.А. АЛОЯН[1], Н.В. КОВАЛЕНКО[1], В.М. АГАФОНОВ[1],
Д.М. МУХАНЬКОВ[2], А.В. КОНЯШКИН[1,2], О.А. РЯБУШКИН[1,2]
[1]Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

КОНЦЕПЦИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Понятие эквивалентной температуры материалов используется в лазерной физике для измерения их коэффициентов оптического поглощения и теплообмена с воздухом. На основе экспериментальных результатов и математического моделирования была показана связь между эквивалентной и термодинамической температурой образцов в условиях неоднородного распределения температуры.

G.A. ALOIAN[1], N.V. KOVALENKO[1], V.M. AGAFONOV[1],
D.M. MUKHANKOV[2], A.V. KONYASHKIN[1,2], O.A. RYABUSHKIN[1,2]
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny
[2]Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

THE EQUIVALENT TEMPERATURE CONCEPT OF MATERIALS UNDER INHOMOGENEOUS TEMPERATURE DISTRIBUTION

The concept of the equivalent temperature of materials is used in laser physics to measure their optical absorption coefficients and heat exchange with air. On the basis of experimental results and mathematical modelling, the relationship between the equivalent and thermodynamic temperature of the samples under conditions of inhomogeneous temperature distribution was shown.

Недавно для измерения малых коэффициентов оптического поглощения нелинейно-оптических кристаллов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, была предложена пьезоэлектрическая резонансная лазерная калориметрия (ПРЛК), основанная на определении кинетики эквивалентной температуры образца, взаимодействующего с лазерным излучением, по измерению индуцированного сдвига частот его пьезоэлектрических резонансов, бесконтактно возбуждаемых внешним

радиочастотным полем [1]. Предварительно проводится температурная калибровка резонансных частот в условиях однородного разогрева. Метод ПРЛК был усовершенствован для измерений малых коэффициентов оптического поглощения массивных кристаллических буль [2]. В этом случае для построения точной математической модели разогрева образцов лазерным излучением необходимо знать соотношение между их термодинамической и эквивалентной температурами, так как в кристаллах больших размеров при взаимодействии с мощным лазерным излучением могут возникать существенные градиенты температуры.

В данной работе экспериментально подтверждено, что в условиях температурного градиента эквивалентная температура с хорошей точностью совпадает со средней термодинамической температурой образца. Это позволяет применять метод ПРЛК для исследования массивных кристаллов. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Кристалл ниобата лития ($3 \times 3 \times 40$ мм^3) находится в конденсаторе, образованном двумя металлическими электродами. Линейный градиент температуры устанавливается в кристалле с помощью двух элементов Пельтье, находящихся в контакте с нижним электродом. Измеренная зависимость эквивалентной температуры кристалла от средней температуры нижнего электрода приведена на рис. 2. Видно, что эквивалентные температуры кристалла, определённые по нескольким резонансам при различном градиенте, совпадают со средней температурой. Это подтверждается и в численных экспериментах даже при более сложных геометрии и распределениях температуры в образцах.

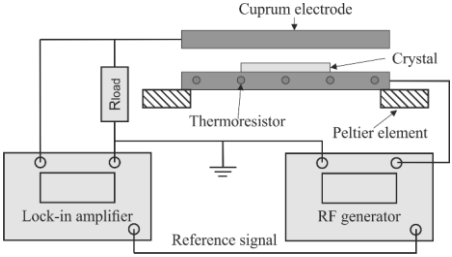


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

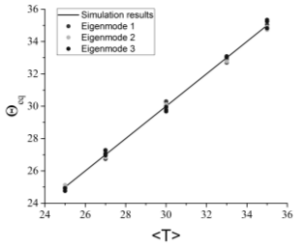


Рис. 2. Связь между средней температурой кристалла и эквивалентными температурами для различных резонансов

Список литературы

1. Vershinin O.I., Konyashkin A.V., Ryabushkin O.A. // Optics letters. 2018. V. 43(1). P. 58-61.
2. Aloian G.. et. al. // Nonlinear Optics and its Applications. 2018. V. 10684.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ДОЛГАНОВ[1], К.Д. БАКЛАНОВА[1,2], В.К. ДОЛГАНОВ[1]
[1]*Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПЛОТНОСТЬ ФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Приводятся результаты исследований оптических свойств холестерических жидкокристаллических фотонных кристаллов. Проведены комплексные спектральные измерения. Из измерений вращения плоскости поляризации света определена плотность фотонных состояний жидкокристаллических фотонных кристаллов. Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией.

P.V. DOLGANOV[1], K.D. BAKLANOVA[1,2], V.K. DOLGANOV[1]
[1]*Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka*
[2]*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

PECULIARITIES OF OPTICAL PROPERTIES AND PHOTONIC DENSITY OF STATES OF CHOLESTERIC PHOTONIC CRYSTALS

Results of investigations of optical properties of cholesteric liquid-crystalline photonic crystals are given. Complex spectral measurements were performed. Photonic density of states in liquid-crystalline photonic crystals was determined from measurements of rotation of the plane of polarization of light. The experimental results are in good agreement with theory.

Жидкие кристаллы, состоящие из ориентационно упорядоченных анизотропных молекул, образуют ряд фотонно-кристаллических структур. Примером одномерного фотонного кристалла может служить холестерический жидкий кристалл со спиральным упорядочением молекул. Благодаря спиральной структуре холестерические фотонные кристаллы обладают рядом особенностей, в частности сильной зависимостью оптических свойств от поляризации световой волны, гигантским вращением плоскости поляризации света, имеющим резонансные особенности вблизи границ фотонной запрещенной зоны. Несмотря на существенный прогресс, достигнутый в исследованиях в

последние годы, целый ряд вопросов относительно фотонных свойств жидкокристаллических фотонных кристаллов остается до конца не проясненным.

В работе выполнены комплексные исследования оптических свойств холестерических фотонных кристаллов, изучена трансформация оптических свойств с изменением толщины образцов и температуры. На образцах высокого совершенства проведены измерения спектров пропускания, отражения, вращения плоскости поляризации света. В спектрах вращения плоскости поляризации света вне фотонной зоны наблюдаются осцилляционные особенности, предсказываемые теорией. Проанализированы поляризационные свойства света, прошедшего через фотонный кристалл. Для образцов большой толщины внутри фотонной зоны поляризация прошедшего света близка к круговой. В образцах малой толщины (< 5 мкм) внутри фотонной зоны свет эллиптически поляризован, вне фотонной зоны поляризация близка к линейной с небольшими осцилляциями эллиптичности, положения которых коррелируют с осцилляциями в спектрах вращения плоскости поляризации.

Из измерений вращения плоскости поляризации с использованием предложенного и впервые использованного нами метода [1, 2] определена плотность фотонных состояний. В спектральной области фотонной зоны плотность состояний существенно уменьшается по сравнению со структурой без фотонной запрещённой зоны. Вблизи границ зоны плотность фотонных состояний имеет резкие максимумы. Экспериментальные результаты сопоставлены с существующими теориями, аналитическими выражениями и результатами численных расчётов. Параметры жидкокристаллической структуры, использованные для расчёта плотности состояний, найдены из независимых измерений спектров пропускания и отражения. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных и расчётных спектров плотности фотонных состояний.

Результаты исследований демонстрируют возможность применения использованного нами метода определения плотности фотонных состояний в других средах с хиральной структурой.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Список литературы

1. Dolganov P.V. // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. P. 042509.
2. Долганов П.В., Бакланова К.Д., Долганов В.К. // ЖЭТФ, в печати.

УДК 535(06)+004(06)

К.Е. ЖЕВАЙКИН, М.И. ФОКИНА, А.С. ШИРОКОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА КРИСТАЛЛИТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СО-КРИСТАЛЛОВ АМИНОПИРИДИН-НИТРОФЕНОЛ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния размера кристаллитов новых нелинейно-оптических органических со-кристаллов 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол и 4-аминопиридин-4-нитрофенол на интенсивность второй оптической гармоники. Также, проведено исследование влияния процессов фотодеградации порошковых со-кристаллов на интенсивность генерации второй оптической гармоники.

K.E. ZHEVAIKIN, M.I. FOKINA, A.S. SHIROKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CRYSTALLINE SIZE OF ORGANIC NONLINEAR OPTICAL CO-CRYSTALS OF AMINOPYRIDINE-NITROPHENOL ON THE INTENSITY OF THE SECOND HARMONIC GENERATION

The results of experiments on the study of influence of the crystalline size new nonlinear optical organic crystals of 2,6-diaminopyridin-4-nitrophenol and 4-aminopyridin-4-nitrophenol on the intensity of the second harmonic generation are presented. A study was also carried out of the effect of photobleaching of powder co-crystals on the intensity of second-harmonic generation.

В настоящее время существует широкий спектр неорганических нелинейно-оптических материалов (KDP, KTP, $LiNbO_3$ и т.д.), которые нашли широкое применение в различных областях оптоэлектроники и фотоники (оптические переключатели, электрооптические модуляторы, приборы для преобразования оптических частот и пр. [1]), возрастающий интерес представляют полимерные композитные и органические нелинейно-оптические материалы, последние из которых обладают рядом преимуществ: высокие значения нелинейно-оптических коэффициентов и низкие значения диэлектрической проницаемости, обусловленные высокой поляризуемостью молекул [2]. Среди наиболее распространённых органических нелинейно-оптических кристаллов

выделяются кристаллы POM, MNA и DAST [3, 4], однако и они имеют ряд недостатков: нестабильность характеристик и деградация под действием высокоинтенсивного лазерного излучения. По данной причине продолжается поиск новых органических нелинейно-оптических материалов, обладающих нелинейно-оптическими свойствами.

Целью данной работы является исследование влияния размера кристаллитов органических нелинейно-оптических со-кристаллов аминопиридин-нитрофенол на интенсивность генерации второй оптической гармоники [5] до фотообесцвечивания и после длительной засветки. Полученные результаты позволят определить диапазон длин когерентности исследуемых со-кристаллов, что, в свою очередь, позволит получить максимальную эффективность преобразования. Также, немаловажной задачей является исследование изменения нелинейно-оптических характеристик исследуемых порошковых со-кристаллов под действием фотообесцвечивания.

В настоящей работе исследованы следующие органические нелинейно-оптические со-кристаллы: 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол (26DAP4N); 4-аминопиридин-4-нитрофенол (4AP4N). Фотообесцвечивание проводилось с помощью УФ-светодиода со следующими параметрами: длина волны 405 нм; мощность излучения 1 Вт; сила света 150 мКд. В ходе данной работы определены диапазоны длины когерентности исследуемых порошковых со-кристаллов до (рис. 1) и после проведения процессов фотодеградации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00643.

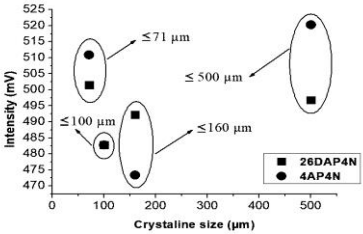


Рис. 1. Зависимость интенсивности второй гармоники от размера кристаллитов органических со-кристаллов 26DAP4N и 4AP4N до фотообесцвечивания

Список литературы

1. Dalton L.R., Sullivan P.A. et. al. // SPIE, Bellingham, WA, 2007.
2. Debrus S., Ratajczak H. et. al. // Synthetic Metals. 2002. V. 127. P. 99-104,
3. Vijay R.J., Melikechi N. et. al. //J. Crystal Growth. 2010. V. 312. P. 420.
4. Аснис Л.Н. // Оптический журнал. 2011. V. 11. P. 96-100.
5. Kiguchi M., Kato M. et. al. // J. Applied Physics. 1994. V. 75. P. 4332-4339.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. АВДЕЕВА[1], С.Я. ВЕТРОВ[1,2], М.В. ПЯТНОВ[1,2],
Н.В. РУДАКОВА[1,2], И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2]
[1]*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ХИРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТАММОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ НА ГРАНИЦЕ АНИЗОТРОПНОГО ЗЕРКАЛА И ХОЛЕСТЕРИКА С КРАСИТЕЛЕМ

Изучен эффект расщепления хирального оптического таммовского состояния (ХОТС), локализованного на границе сохраняющего поляризацию анизотропного зеркала (СПАЗ) и холестерического жидкого кристалла (ХЖК) с красителем. Показаны условия возникновения высокодобротных резонансов, проявляемых в спектре отражения в виде провалов, которые могут быть использованы при создании узкополосных фильтров.

A.Yu. AVDEEVA[1], S.Ya. VETROV[1,2], M.V. PYATNOV[1,2],
N.V. RUDAKOVA[1,2], I.V. TIMOFEEV[1,2]
[1]*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

CHIRAL OPTICAL TAMM STATES AT THE INTERFACE BETWEEN AN ANISOTROPIC MIRROR AND A CHOLESTERIC WITH DYE

The effect of chiral optical Tamm state (COTS) splitting which is localized at the interface between the polarization preserving anisotropic mirror (PPAM) and dye doped cholesteric liquid crystal (CLC) has been investigated. Conditions for appearance of high-quality resonances manifested in the form of dips in reflection spectrum, that can be used to create narrow-band filters, have been found.

ХОТС представляет собой моду, локализованную на границе раздела между СПАЗ-структурой из чередующихся одинаковых одноосных диэлектрических слоев с ортогональными направлениями оптических осей и хиральной средой, такой как ХЖК [1]. В работе [2] было показано высокодобротное ХОТС, эффективно перестраиваемое по частоте.

В настоящей работе мы получили расщепление ХОТС, локализованного на границе ХЖК и СПАЗ, путем добавления в ХЖК молекул красителя (рис. 1).

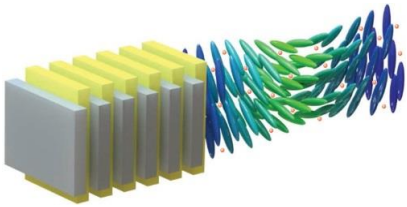


Рис. 1. Схематическое представление структуры, состоящей из СПАЗ и ХЖК, допированного красителем

Наличие молекул красителя влияет на положение и ширину фотонной запрещенной зоны ХЖК [3]. В нашем случае, при совпадении частоты ХОТС с частотой резонанса молекул красителя в спектре отражения структуры, рассчитанном методом Берремана, наблюдаются два провала, соответствующие локализованным таммовским состояниям. Спектр отражения показан на рис. 2, величина расщепления ХОТС составляет 12 нм. С ростом концентрации молекул красителя расщепление увеличивается. Показано, что величина расщепления и характеристики новых таммовских состояний существенно зависят от параметров красителя, что позволяет расширить возможности управления спектральными свойствами ХОТС.

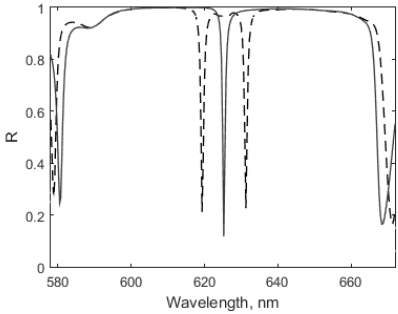


Рис. 2. Спектр отражения структуры для ХЖК без молекул красителя (сплошная линия), в присутствии красителя (пунктирная линия)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и ККФН в рамках научного проекта № 19-24-240004.

Список литературы

1. Timofeev I.V., Vetrov S.Ya. // JETP Letters. 2016. V. 104. P. 380-383.
2. Rudakova N.V., Timofeev I.V. et. al. // Crystals. 2019. V. 9 (10). P. 502.
3. Gevorgyan A.H. // Phys.Rev.E. 2019 V. 99. P. 012702.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. РОМАШКИНА, В.Б. НОВИКОВ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

Изучены оптические эффекты в новом типе одномерных магнитоплазмонных кристаллов, основанных на биметаллических плёнках золото/пермаллой, нанесенных на диэлектрическую дифракционную решетку. Обнаружено усиление магнитного контраста коэффициента пропускания света в геометрии Фохта, а также резонансное усиление и магнитный контраст генерации второй оптической гармоники при возбуждении поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела золото/пермаллой/воздух.

A.M. ROMASHKINA, V.B. NOVIKOV, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

MAGNETOOPTICAL EFFECTS AND SECOND HARMONIC GENERATION IN MAGNETOPLASMONIC CRYSTALS BASED ON BIMETALLIC FILMS

We studied optical effects in a new type of one-dimensional magnetoplasmonic crystals based on gold/permalloy bimetal films deposited on dielectric diffraction grating. The enhancement of the magnetic contrast of the transmission coefficient in the Voigt geometry in spectral vicinity of the plasmon resonance was observed. The resonant enhancement and magnetic contrast of the second harmonic generation originated from the excitation of the surface plasmon-polariton were demonstrated.

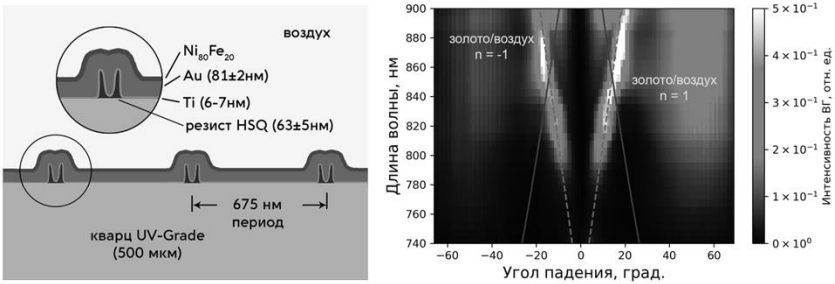
Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) представляют состояния света, локализованные на плоской границе между металлом и диэлектриком. При этом оптические характеристики границы раздела существенно влияют на свойства ППП из-за субволнового пространственного масштаба концентрации их электромагнитного поля. Это позволяет значительно усилить обычно слабые магнитооптические эффекты при расположении магнитного материала вблизи границы, поддерживающей распространение ППП, что может применяться в магнитооптике [1], высокочувствительных сенсорах [2, 3], для хранения информации [3]. Также локальное увеличение интенсивности излучения

лазерной накачки при возбуждении ППП позволяет многократно усилить нелинейно-оптические явления [4].

В работе исследованы оптические эффекты в магнитоплазмонных кристаллах (МПК) нового типа, представляющих собой биплёнку золото (81 нм)/пермаллой (11 нм), нанесенную на одномерную диэлектрическую дифракционную решётку с периодом 675 нм, полученную методом электронной литографии на кварцевой подложке (рис. 1*а*). Использование золота обеспечивает возбуждение плазмонных резонансов высокой добротности, а наличие слоя ферромагнитного металла придает МПК магнитооптические свойства.

Обнаружено возбуждение ППП резонансов высокой добротности различных порядков дифракции на границах золото/пермаллой/воздух и золото/кварц в изучаемых МПК, проявляющееся минимумами в частотно-угловых зависимостях коэффициента пропускания света МПК. Вблизи плазмонного резонанса показано резонансное усиление магнитного контраста коэффициента пропускания в геометрии Фохта, достигающее 1 %, а также резонансное усиление генерации второй оптической гармоники (ВГ) при возбуждении ППП на границе раздела золото/пермаллой/воздух (рис. 1*б*). Обнаружен магнитный контраст интенсивности ВГ, достигающий 10 %.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-02-00826.



а *б*

Рис. 1. Схема поперечного профиля структуры (*а*), частотно-угловой спектр интенсивности ВГ в МПК (*б*)

Список литературы

1. Belotelov V.I. et. al. // Nature nanotechnology. 2011. V. 6. P. 370.
2. Pang L. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 123112.
3. Moradi M. et. al. // Electron. Mater. Lett. 2015. V. 11 (3). P. 440.
4. Agarwal G.S. et. al. // Phys. Rev. B. 1982. V. 26. P. 482.

УДК 535(06)+004(06)

В.Е. АНИКЕЕВА[1,2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1,2], О.И. СЕМЕНОВА[3]
[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[2]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[3]*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИКИ КРИСТАЛЛАХ $MAPbI_3$

Проведён анализ структурных фазовых переходов в монокристаллах $MAPbI_3$ по температурным зависимостям спектров фотопроводимости, фотолюминесценции, поглощения и из ультразвуковых исследований. Сделана попытка объяснения наблюдаемых зависимостей. Обнаружен гистерезис при низкотемпературном фазовом переходе.

V.E. ANIKEEVA[1,2], K.N. BOLDYREV[1,2], O.I. SEMENOVA[3]
[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[2]*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[3]*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk*

STUDY OF PHASE TRANSITIONS IN PERSPECTIVE FOR PHOTOVOLTAIC $MAPbI_3$ CRYSTALS

The structural phase transitions in MAPbI3 single crystals are analyzed by the temperature dependences of the photoconductivity, photoluminescence, absorption spectra and by ultrasound measurements. An attempt was made to explain the observed dependencies. Hysteresis was detected during a low-temperature phase transition.

На сегодняшний день гибридные металл-органические перовскиты (МОП) являются одними из самых перспективных новых материалов для различных фотовольтаических устройств таких как фотодетекторы, лазеры и светодиоды [1, 2]. Благодаря оптимальным фотоэлектронным и оптическим свойствам таким как подходящая ширина запрещённой зоны, низкая энергия связи экситона, высокий коэффициент поглощения и высокое значение диффузионной длины, к 2018 году удалось создать тандемные солнечные элементы на основе МОП и кремния с КПД 28 % [3]. Несмотря на большое количество публикаций, посвящённых исследованию МОП, остаются вопросы, связанные с зонной структурой этого органо-неорганического полупроводника.

В данной работе были исследованы ранее синтезированные монокристаллы $MAPbI_3$ высокого качества. Состав и структура образцов подтверждены методами РФЭС и дифракцией быстрых электронов на отражение [4]. Низкотемпературный фазовый переход при 160 K наблюдался в спектрах фотолюминесценции, пропускания и в ультразвуковых исследованиях. По построенным температурным зависимостям смещения края зоны можно видеть наличие гистерезиса при нагреве и охлаждении в спектрах пропускания (рис. 1). Также гистерезис наблюдается и в температурной зависимости затухания продольной ультразвуковой волны (рис. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемый структурный фазовый переход является фазовым переходом первого рода. По спектрам фотопроводимости был исследован высокотемпературный фазовый переход, сопровождающийся сильным изменением фототока при температуре около 330 K. Кроме того, в спектральных зависимостях фотолюминесценции и в спектрах пропускания при температурах ниже 90 K наблюдаются особенности, связанные с квазимолекулярными колебаниями катиона MA.

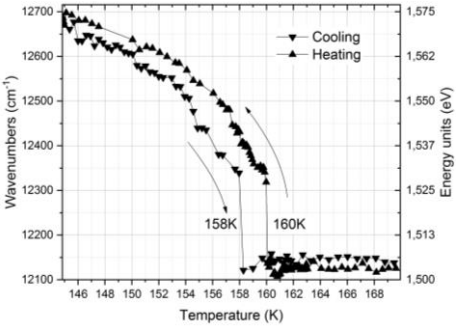


Рис. 1. Смещение края зоны вблизи фазового перехода, исследованное по спектрам пропускания

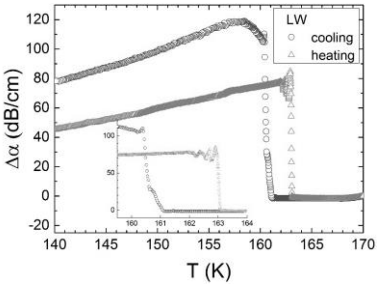


Рис. 2. Температурная зависимость затухания продольной ультразвуковой волны в $MAPbI_3$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РФФИ № 18-32-20142).

Список литературы

1. Park N.G., Grätzel M. et. al. // Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
2. Chen Z., Turedi B. et. al. // ACS Energy Lett. 2019. V. 4. P. 1258.
3. Qian J. et. al. // Sustainable Energy Fuels. 2019. V. 3. P. 1439.
4. Anikeeva V.E., Semenova O.I. et. al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124. P. 041008.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. ЗАБОЛОТСКИЙ[1,2], А.В. КАЦАБА[1,2], С.А. АМБРОЗЕВИЧ[1,2,3], А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ[1,2]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

[3]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

ФОТОДЕГРАДАЦИЯ КОЛЛОИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CdS/ZnSe

Исследована зависимость интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов CdS/ZnSe при 85 и 300 К. Установлено, что фотодеградация нанокристаллов состоит из обратимой и необратимой составляющих. Найдены характерные времена деградации нанокристаллов, и определена природа этих процессов.

M.S. ZABOLOTSKY[1,2], A.V. KATSABA[1,2], S.A. AMBROZEVICH[1,2,3], A.G. VITUKHNOVSKY[1,2]

[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

[3]*Bauman Moscow State Technical University*

PHOTODEGRADATION PROCESS IN COLLOIDAL CdS/ZnSe NANOCRYSTALS

The dependence of the photoluminescence intensity of CdS/ZnSe nanocrystals at 85 and 300 K was studied. It was found that the photodegradation of nanocrystals consists of reversible and irreversible components. The characteristic times of degradation of nanocrystals were found and the nature of these processes was determined.

Уникальные свойства полупроводниковых нанокристаллов позволяют использовать их в качестве источников света, биологических маркеров и др. Эффект размерного квантования позволяет получать нанокристаллы с заданным положением максимума люминесценции. Также нанокристаллы обладают высоким квантовым выходом.

Полупроводниковые нанокристалы обладают развитой поверхностью, что приводит к возникновению дополнительных полос люминесценции [1, 2] и появлению электронных ловушек на поверхности [3, 4].

В данной работе исследовалась фотостабильность коллоидных нанокристаллов CdS/ZnSe при 85 и 300 К. Образец находился в откаченном азотном криостате.

Зависимость интенсивности люминесценции нанокристаллов от времени при 85 и 300 К (рис. 1) является двухэкспоненциальным процессом. Характерное время быстрой компоненты составляет около 260 при 85 К и при 300 К. Данный процесс мы связываем с захватом носителей заряда на поверхностные ловушки с образованием канала безызлучательной рекомбинации. Медленная компонента имеет характерное время около 2 часов при 300 К и несколько десятков часов при 85 К, что объясняется фотоиндуцированным отрывом пассиватора (олеиновой кислоты) от поверхности нанокристалла. При 300 К также наблюдается частично обратимая деградация (рис. 2), проявляющаяся в небольшом увеличении интенсивности люменесценции после отключения возбуждения на определенный промежуток времени. Это обусловлено появлением Оже-рекомбинации при захвате носителя заряда на поверхности нанокристалла [4]. При высвобождении носителя заряда данный процесс прекращается.

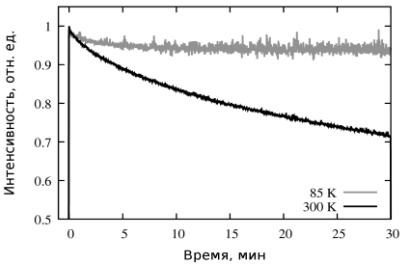


Рис. 1. Зависимость интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов CdS/ZnSe от времени при 85 и 300 К

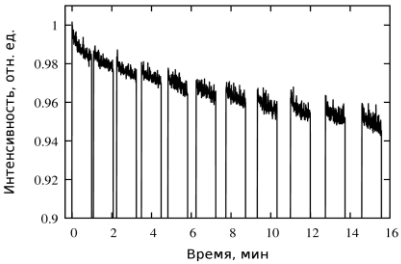


Рис. 2. Зависимость интенсивности фотолюминесценции нанокристаллов CdS/ZnSe от времени при 300 К с периодическим отключением фотовозбуждения

Список литературы

1. Katsaba A.V., Ambrozevich S.A. et. al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113(18). P. 184306.
2. Katsaba A.V., Ambrozevich S.A. et. al. // Semiconductors. 2013. V. 47(10). P. 1328-1332.
3. Katsaba A.V., Ambrozevich S.A. et. al. // Semiconductors. 2015. V. 49(10). P. 1323-1326.
4. Katsaba A.V., Ambrozevich S.A. et. al. // Journal of Luminescence. 2019. V. 21. P. 116601.

УДК 535(06)+004(06)

М.Т. МЕТЛИН[1,2], С.А. АМБРОЗЕВИЧ[1,2,3], И.В. ТАЙДАКОВ[1], В.В. ФЕДЯНИН[4], П.Н. ТАНАНАЕВ[5]

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
[4]*Московский педагогический государственный университет*
[5]*Научно-технологический испытательный центр «Нанотех-Дубна», Дубна*

ИСТОЧНИК ОДИНОЧНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CdSe/CdS/ZnS И КОМПЛЕКСА Nd(III) С ЛИГАНДНЫМ ОКРУЖЕНИЕМ ИЗ КЛАССА 1,3-ДИКЕТОНОВ

Впервые в качестве источника одиночных инфракрасных фотонов предложена гибридная структура на основе коллоидных нанокристаллов CdSe/CdS/ZnS и пиразолсодержащих 1,3-дикетонатных координационных соединений Nd(III).

M.T. METLIN[1,2], S.A. AMBROZEVICH[1,2,3], I.V. TAYDAKOV[1], V.V. FEDYANIN[4], P.N. TANANAEV[5]

[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Bauman Moscow State Technical University*
[3]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*
[4]*Moscow Pedagogical State University*
[5]*Scientific and Technological Center «Nanotech-Dubna», Dubna*

INFRARED SINGLE PHOTON EMITTERS BASED ON CdSe/CdS/ZnS COLLOIDAL NANOCRYSTALS AND 1,3-DIKETONATES OF Nd(III) ION

Novel unique single-photon IR-emitting hybrid structure was developed based on CdSe/CdS/ZnS colloidal nanocrystals and 1,3-diketone Nd(III) complexes.

Однофотонные источники, излучающие в диапазоне длин волн 800 - 1500 нм, являются необходимым элементом связи в квантовой криптографии [1]. Однако, даже коммерчески доступные эмиттеры одиночных фотонов, имеют низкую квантовую эффективность и зачастую для стабильной работы в режиме однофотонной эмиссии необходимо наличие инертной среды и криогенных температур [2].

Гибридные структуры на основе нанокристаллов и координационных комплексов ионов лантаноидов являются перспективными структурами, излучающими в однофотонном режиме.

Коллоидные нанокристаллы CdSe/CdS/ZnS способны излучать в однофотонном режиме в диапазоне длин волн 500-700 нм с максимумом на 630 нм [3]. Координационные соединения на основе иона Nd(III) проявляют характерную для неодима эмиссию на 1330 нм. Кроме того, данные комплексы имеют характерное для иона неодима поглощение в области 500 - 600 нм.

В работе показано, что использование гибридных структур на основе нанокристаллов CdSe / CdS / ZnS и пиразолсодержащих 1,3-дикетонатных координационных соединений Nd(III) позволяет создавать источники одиночных инфракрасных фотонов (рис. 1).

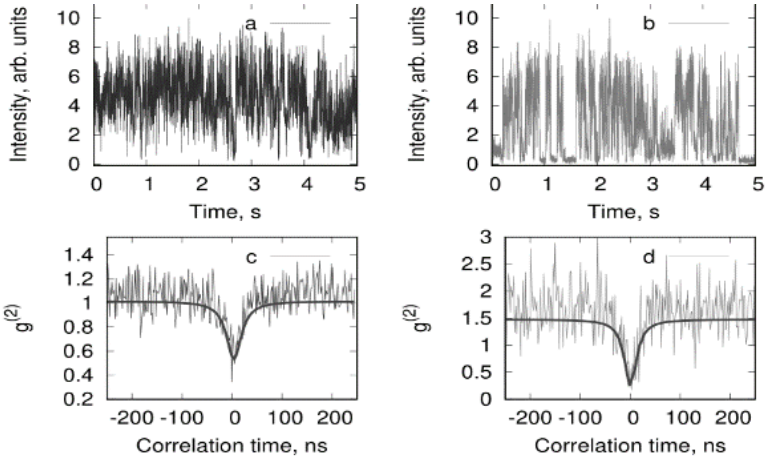


Рис. 1. Временные зависимости интенсивности люминесценции в полосе 630 нм одиночного нанокристалла (a) и одиночного нанокристалла в составе гибридной структуры (b) при непрерывном оптическом возбуждении на длине волны 376 нм; корреляционные функции $g^{(2)}$ для одиночного нанокристалла (c) и в составе гибридной структуры (d)

Список литературы

1. Efros A.L., Rosen M. // Physical Review Letters. 1997. V. 78 (6). P. 1110-1113.
2. Wu Z. et. al. // Journal of Luminescence. 2009. V. 129 (10). P. 1125-1131.
3. Ma Q.-F. et. al. // Journal of Luminescence. 2011. V. 131 (11). P. 2267-2272.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. РАДИОНОВ[1,2], А.В. ПЕСЧАНСКИЙ[3], Н.Н. НОВИКОВА[1], В.А. ЯКОВЛЕВ[1], С.А. КЛИМИН[1]

[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

[3]*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков*

ИК-ФОНОНЫ И СПИН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КРИСТАЛЛЕ $LiNiPO_4$

Приведены результаты экспериментального исследования фононного спектра монокристалла $LiNiPO_4$ методами ИК спектроскопии. Получены спектроскопические параметры ИК-фононов при комнатной температуре. Обнаружено спин-фононное взаимодействие по смещению частоты обертонов вблизи температуры Нееля.

M.S. RADIONOV[1,2], A.V. PESCHANSKII[3], N.N. NOVIKOVA[1], V.A. YAKOVLEV[1], S.A. KLIMIN[1]

[1]*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

[3]*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine, Khar'kov*

IR PHONONS AND SPIN-PHONON INTERACTION IN $LiNiPO_4$

Results on the experimental study of the $LiNiPO_4$ single crystal are presented by means of IR spectroscopy. Spectroscopic parameters of the IR phonons are obtained at room temperature. Frequency shift in the vicinity of the Neel temperature indicates the presence of significant spin-phonon interaction in a crystal under study.

Кристалл $LiNiPO_4$ вызывает интерес по двум причинам: это перспективный материал для применения в литий-ионных аккумуляторах [1, 2] и низкотемпературный магнетик [3, 4] с интересными фазовыми диаграммами и мультиферроидными свойствами. Информация об ИК-фононах в литературе скудна, подробно исследованы только КРС-активные фононы [5]. В данной работе был исследован спектр ИК-фононов при комнатной температуре, а также спектр обертонов при охлаждении вплоть до гелиевых температур. Целью работы является экспериментальное исследование ИК-фононов в поляризованном свете и

обнаружение особенностей, связанных с присущими мультиферроикам взаимодействиями различных подсистем, в частности, решетки и магнитной подсистемы.

Спектры отражения в поляризованном свете были измерены с помощью фурье-спектрометра IFS66 фирмы Bruker. Низкотемпературные спектры пропускания исследовались на фурье-спектрометре Bruker IFS125HR при помощи оптического криостата Cryomech PT403.

В результате исследования спектров отражения и дальнейшего моделирования получены параметры ИК-фононов: частоты, силы осцилляторов и коэффициенты затухания, а также определены неприводимые представления каждого фонона. В области фонона B_{2u} с частотой 999 см$^{-1}$ обнаружено резонансное усиление обертона за счет эффекта Ферми. Найдено, что в области обертонов две линии поглощения (1825.3 и 1833 см$^{-1}$) реагируют на магнитное упорядочение. При температуре вблизи 21 К было обнаружено их резкое смещение к частотам 1824.3 и 1832 см$^{-1}$, соответственно (рис. 1). Этот факт однозначно говорит о заметном взаимодействии магнитной и решеточной степеней свободы в кристалле $LiNiPO_4$. Возможным объяснением сдвига линий поглощения могла бы быть магнитострикция, возникающая при магнитном упорядочении.

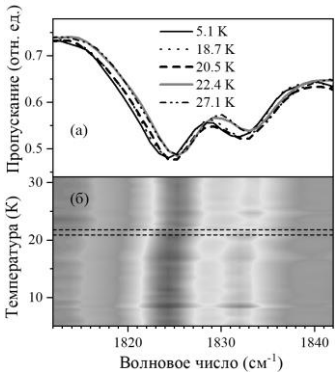


Рис. 1. Спектры пропускания монокристалла $LiNiPO_4$ при различных температурах (а), карта интенсивностей (б)

Список литературы

1. Karthickprabhu S. et. al. // Mater. Lett. 2019. V. 237. P. 224-227.
2. Ornek A. // Chem. Eng. J. 2018. V. 331. P. 501-509.
3. Lewinska S. et. al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 214440.
4. Peedu L. et. al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 024406.
5. Fomin V.I. et. al. // Low Temp. Phys. 2002. V. 28. P. 288-296.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Д. ИСХАКОВА, Ф.О. МИЛОВИЧ, В.М. МАШИНСКИЙ,
В.В. ВЕЛЬМИСКИН, Е.А. ПЛАСТИНИН, А.Л. ВАСИЛЬЕВ[1],
В.И. БОНДАРЕНКО[2], М.Ю. ПРЕСНЯКОВ[1]

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва
[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
[2]Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

АКТИВИРОВАННЫЕ ВИСМУТОМ ПРЕФОРМЫ, СВЕТОВОДЫ, СТЁКЛА: МИКРОСТРУКТУРА, СОСТАВ, НАНОВКЛЮЧЕНИЯ И Bi-КЛАСТЕРЫ

Микроструктура, распределение элементов, нанокристаллические включения и Bi-кластеры изучены в Bi-активированных силикатных стёклах, преформах и волоконных световодах методами аналитической электронной микроскопии. Природа нанокристаллических включений зависит от содержания висмута и состава стекла сердцевин преформ и световодов. Показана перспективность использования пористых стёкол для изготовления волоконных световодов с точки зрения гомогенности состава и структуры и повышения концентрации Bi.

L.D. ISKHAKOVA, F.O. MILOVICH, V.M. MASHINSKY,
V.V. VELMISKIN, E.A. PLASTININ, A.L. VASILIEV[1],
V.I. BONDARENKO[2], M.Yu. PRESNIAKOV[1]

Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow
[1]National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow
[2]Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow

BISMUTH-DOPED SILICA FIBERS, PREFORMS AND GLASSES: MICROSTRUCTURE, COMPOSITION, NANOCRYSTALLINE INCLUSIONS AND Bi-CLUSTERS

Microstructure, spatial element distributions, nanocrystalline inclusions and Bi-clusters have been studied in Bi-doped silica glasses, preforms and fibers using high resolution electron microscopy and X-ray microanalysis. The nature of nanocrystalline inclusions in these samples depends on Bi concentration and the ratio of the dopant concentrations in the core glass. The advantage of the porous glasses use for optical fibers manufacture have been demonstrated from the viewpoint the homogeneity of its composition and structure, and rise of Bi-concentration.

Прогресс в разработке технологий активированных висмутом волоконных световодов (ВС) с высокими оптическими характеристиками требует создания ВС с гомогенностью сердцевин на наноуровне и повышения содержания висмута. Цель работы состояла в исследовании состава, микроструктуры и нановключений, влияющих на оптические потери в ВС, методами рентгеноспектрального микроанализа и электронной микроскопии высокого разрешения.

Образцы готовились методами MCVD, FCVD и «powder-in-tube»; составы стекла сердцевин соответствовали системам Al_2O_3 - SiO_2 (I), GeO_2 - SiO_2 (II), Al_2O_3 - GeO_2 - SiO_2 (III), GeO_2 - P_2O_5 - SiO_2 (IV), P_2O_5 - SiO_2 (V), Al_2O_3 - P_2O_5-SiO_2 (VI). Установлено, что природа нановключений зависит от концентрации Bi, состава легирующих компонентов и соотношения концентраций Bi/легирующий компонент. Как нановключения в преформах и ВС, состав стекла сердцевины которых соответствует системам I - IV, идентифицированы нанокристаллы металлического Bi, α-SiO_2, α-Bi_2O_3, гексагонального GeO_2 и $Bi_4(GeO_4)_3$ [1].

Применение пористых стёкол (ПС) как матрицы для сердцевины ВС позволяет предположить, что их микроструктура будет способствовать гомогенному распределению Bi-ионов при одновременном повышении их концентрации. Показано, что при среднем размере пор 4 нм ПС имеют поверхностный слой толщиной около 200 нм с каналами до 40 нм. Пропиткой ПС раствором $Bi(NO_3)_3$ с последующей термообработкой получены прозрачные консолидированные образцы с содержанием Bi $\leq 0.01 \div 0.8$ ат.%, которые использовались как сердцевины преформ для вытяжки ВС. Методом ПЭМ подтверждена гомогенность образцов [2].

Идентификация атомов (ионов) Bi и Bi – кластеров проведена при исследовании образцов с помощью ПЭМ высокого разрешения с детектором HAADF-STEM. Объектами исследования являлись Bi-активированные стекла системы MgO - Al_2O_3 - SiO_2 с ИК-люминесценцией в области 1050 - 1600 нм. В образцах стёкол идентифицированы индивидуальные ионы Bi^{3+}, субвалентные ионы висмута, Bi-димеры и Bi-кластеры. Bi-кластеры с размерами порядка 12 Å, найденные при содержанием Bi > 0.2 ат.%, являются вероятнее всего нейтральными кластерами $(Bi_n)^o$ с n до 18 и зародышами для появления нановключений металлического висмута [3].

Список литературы

1. Iskhakova L.D., Milovich F.O. et. al. // Microsc. Microanal. 2016. V. 22. P. 987-996.
2. Iskhakova L.D., Mashinsky V M. et. al.// J. Non-Cryst. Solids. 2019. V. 503-504. P. 28-35.
3. Milovich F.O., Iskhakova L.D. et. al// J. Non-Cryst. Solids. 2019. V. 510. P. 166-171.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. КОПЬЕВА, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА
Российский университет дружбы народов, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ СРЕД С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Работа посвящена исследованию оптических спектров поглощения и пропускания композитных сред, содержащих металлические частицы золота сферической и несферической формы с использованием модели эффективной среды Максвелла Гарнетта. Выявлена зависимость резонансного поглощения от пространственной ориентации частиц несферической формы. Рассчитаны дисперсионные зависимости для коэффициентов отражения и пропускания при разных углах падения излучения. Обнаружен сдвиг максимума поглощения в коротковолновую область спектра при отклонении угла падения от нормали.

M.S. KOPYEVA, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHLOVA
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA WITH METAL NANOPARTICLES OF VARIOUS SHAPES

The work is devoted to the study of optical absorption and transmission spectra of composite media containing spherical and non-spherical metallic gold particles using the Maxwell Garnett model of an effective medium. The dependence of resonance absorption on the spatial orientation of non-spherical particles is revealed. The dispersion dependences for the reflection and transmission coefficients are calculated at different angles of incidence of radiation. A shift of the absorption maximum to the short-wavelength region of the spectrum was detected when the angle of incidence deviated from the normal.

Теория эффективной среды Максвелла Гарнетта позволяет рассматривать композитную среду с поглощающими наночастицами как однородную с эффективными параметрами n_{eff} и ε_{eff}, которые учитывают свойства матрицы, частиц, включенных в эту матрицу, их количество, форму и пространственную ориентацию относительно падающей волны [1]. В данной работе были рассчитаны коэффициенты отражения R и пропускания T при нормальном падении электромагнитного излучения и при его отклонении от нормали. Рассмотрен случай, когда электрический вектор поляризации падающей волны перпендикулярен плоскости падения (TE-волна) [2].

Графики на рис. 1 показывают, что использование несферических наночастиц приводит к увеличению поглощения оптического излучения и к уширению полосы поглощения. Пространственная ориентация несферических наночастиц также влияет на коэффициент поглощения композитной среды. Видно, что в случае, когда наночастицы эллипсоидальной формы ориентированы в матрице так, что поле *E* направлено перпендикулярно полярной полуоси *a*, зависимость имеет вид, характерный для композитной среды со сферическими частицами. В случае, когда поле *E* направлено вдоль полярной полуоси *a* имеет место максимальное поглощение излучения на длине волны 625 нм.

Зависимость коэффициента пропускания T_{TE} от угла падения излучения в интервале от 0 до 45 º показана на рис. 2. При увеличении угла θ_1 ширина полосы поглощения уменьшается, и происходит смещение минимума коэффициента пропускания в УФ область.

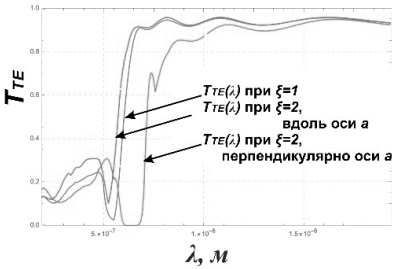


Рис. 1. Дисперсионные зависимости коэффициента пропускания (T_{TE}) композита со сферическими (1) и эллипсоидальными (2, 3) частицами при разной ориентации вектора поляризации

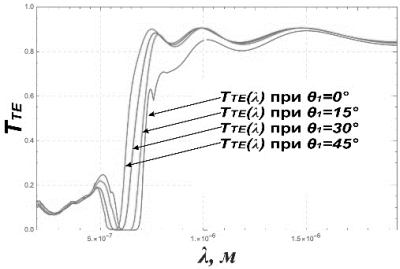


Рис. 2. Дисперсионные зависимости коэффициента пропускания (T_{TE}) композита с наночастицами эллипсоидальной формы при разных углах падения электромагнитного излучения θ_1

Список литературы

1. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства нанокомпозитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 6. С. 619-638.

2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

УДК 535(06)+004(06)

С.Ф. УМАНСКАЯ, А.Д. КУДРЯВЦЕВА, Н.В. ЧЕРНЕГА, М.А. ШЕВЧЕНКО
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

НАНОЧАСТИЦЫ РУБИНА: ПОЛУЧЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Наночастицы рубина (Cr^{3+}:Al_2O_3) синтезированы методом лазерной абляции. Методом динамического рассеяния света было определено распределение рубиновых наночастиц по размерам. Получены спектры пропускания и фотолюминесценции при возбуждении в диапазоне от 200 до 900 нм. Зарегистрированы спектры люминесценции при возбуждении наносекундным импульсом второй гармоники (532 нм) Nd:YAG лазера.

S.F. UMANSKAYA, A.D. KUDRYAVTSEVA, N.V. TCHIERNIEGA, M.A. SHEVCHENKO
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

RUBY NANOPARTICLES: PRODUCTION AND OPTICAL PROPERTIES

Ruby nanoparticles (Cr^{3+}:Al_2O_3) were synthesized by laser ablation method. The dynamic light scattering was used to determine the size distribution of ruby nanoparticles. The transmission and photoluminescence spectra upon excitation in the range from 200 to 900 nm were obtained. Luminescence spectra upon excitation by a second harmonic (532 nm) of Nd:YAG laser was recorded.

Наночастицы различных материалов являются актуальным предметом исследований на протяжении многих лет благодаря их уникальным свойствам, которые дают возможность их использования в различных областях науки, технологий и в медицине. Метод лазерной абляции [1] отличается от других методов получения наночастиц простотой и высокой чистотой получаемых суспензий.

Синтетические кристаллы рубина (Al_2O_3 с примесью ионов Cr^{3+}) находят применение в качестве лазерного активного элемента, обладают высокой интенсивностью, узкой линией и длительным временем жизни люминесценции. В то же время рубин является нетоксичным материалом, что делает рубиновые наночастицы [2] перспективным материалом для применения в области медицины.

Синтез наночастиц производился под действием наносекундных импульсов Nd:YAG лазера (при длине волны 1064 нм энергия составляла 0.1 Дж, при длине волны 532 нм – 30 мДж и 0.1 Дж, длительность импульса 10 нс), сфокусированных сферической линзой (F = 2.5 см). Схема установки представлена на рис. 1.

Были определены условия получения наночастиц со средним размером 80 нм. Распределение полученных частиц по размерам проводилось методом динамического рассеяния света с помощью анализатора Photocor Compact-Z. С помощью спектрофлюориметра Hitachi F7000 были получены спектры флюоресценции в спектральном диапазоне возбуждения от 200 до 900 нм для суспензии наночастиц рубина. Также при возбуждении наносекундными импульсами второй гармоники (532 нм) Nd:YAG лазера была исследована люминесценция суспензии наночастиц рубина. Типичный спектр представлен на рис. 2. Определен вид нелинейной зависимости интенсивности люминесценции наночастиц от интенсивности лазерного излучения, также определен порог возбуждения. Исследована зависимость интенсивности люминесценции и значение порога её возбуждения от концентрации наночастиц.

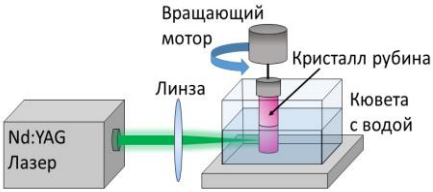


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

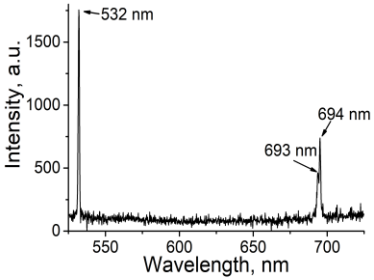


Рис. 2. Спектр люминесценции наночастиц рубина при возбуждении второй гармоники Nd:YAG лазера

Список литературы

1. Hanh A., Barcikowski S. et. al. // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. 2018. V. 3 (2). P. 73.

2. Edmonds A., Sobhan A. et. al. // Particle & Particle Systems Characterization. 2013. V. 30(6). P. 506.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. САПАРИНА[1], С.С. ХАРИНЦЕВ[1,2], А.И. ФИШМАН[1], А.А. СТОЛОВ[3]

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
[2]*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*
[3]*Компания «Optical Fiber Solutions», Эйвон, США*

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРО- И ТЕРМО-АССИСТИРУЕМОГО ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В настоящее время одной из важных задач в области оптоэлектроники является управление электрофизическими свойствами тонких проводящих пленок. Углеродные аллотропные модификации и композитные материалы на их основе занимают уникальное место с точки зрения их способности проводить электричество. Последние исследования [1, 2] отмечают, что электрические свойства тонкой углеродной пленки сильно зависят от ее качества и структуры. В частности, все больший интерес приобретает возможность изменять электрические свойства нанокомпозитных пленок, варьируя размеры углеродных частиц из которых она состоит. Однако не менее важным вопросом является также влияние дефектов и пористости пленки на проводимость. Целью настоящей работы является наноспектроскопический анализ неупорядоченных проводящих покрытий и композитов, нагреваемых постоянным электрическим током.

S.V. SAPARINA[1], S.S. KHARINTSEV[1,2], A.I. FISHMAN[1], A.A. STOLOV[3]

[1]*Kazan Federal University*
[2]*Intitute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*
[3]*Optical Fiber Solutions, Avon, USA*

THE INVESTIGATION OF CARBON NANOCOMPOSITE FILMS THROUGH THE USE OF ELECTRO- AND THERMO- ASSISTED TIP-ENHANCED RAMAN SCATTERING METHODS

In this study for chemical sensing of low-dimensional (15-30 nm) carbon allotropes in the thin carbon films on nanoscale a new hybrid method was used that based on the combination of local enhanced anti-Stokes tip-enhanced Raman scattering of light and electro-induced heating of conductive carbon coating. This method made it possible to selectively perform the structural composition of films, 3D visualization of various forms of carbon and the determination of their orientation and symmetry. Based on the

obtained results a model of hysteresis of the resistance of an amorphous film during its subsequent heating and cooling was proposed.

В настоящей работе для изучения электрических свойств нанокомпозитных углеродных пленок в качестве образцов использовались искривленные стеклянные подложки, покрытые углеродным слоем различной толщины.

Для объяснения гистерезиса (рис. 1) и необычной зависимости сопротивления тонких углеродных пленок с температурой был использован новый гибридный подход, основанный на комбинировании локально-усиленного антистоксовского гигантского комбинационного рассеяния света и электроиндуцированного нагрева углеродного покрытия. Этот метод позволил нам селективно проанализировать структурный состав углеродных покрытий оптических волокон, визуализировать различные формы углерода, а также определить ориентацию углеродных аллотропов и их симметрию. Опираясь на результаты спектроскопических исследований, была предложена, объясняющая наличие петли гистерезиса сопротивления.

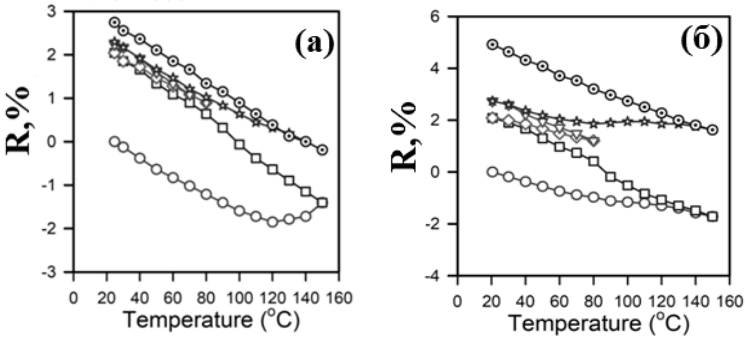


Рис. 1. Зависимость относительного изменения сопротивления углеродной пленки с толщиной 12.2 нм (а) и 107 нм (б) от температуры

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РНФ (№19-12-00066).

Список литературы

1. Moustafa S.H., Koos M., Pocsik I. // J. Non-Cryst. 1998. V. 227-230. P. 1087-1091.
2. Robertson J. // Adv. Phys. 1986. V. 35. P. 317-374.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. НОВИКОВА, В.А. ЯКОВЛЕВ, И.В. КУЧЕРЕНКО[1],
А.В. МУРАТОВ[1], Г. КАРЧЕВСКИ[2], Ш. ШРАЙЭК[3]

Институт спектроскопии РАН, Троицк
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[2]Институт физики Польской академии наук, Варшава, Польша
[3]Вюрцбургский университет, Германия

ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТ ПЛАЗМОНОВ И ИК-ФОНОНОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛЕНКАХ $Pb_{1-X}Sn_XTe$ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs/CdTe

Впервые из измерений ИК спектров отражения были определены температурные зависимости ТО фононов и температуры структурного фазового перехода в пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с x > 0.2 (x = 0.25 и 0.53). Было обнаружено, что во всех исследуемых пленках (x = 0.25, 0.53, 0.59) плазменная частота увеличивается при понижении температуры, что связано, главным образом, с уменьшением эффективной массы носителей и переходом носителей из вихревых состояний на поверхности пленки в валентную зону.

N.N. NOVIKOVA, V.A. YAKOVLEV, I.V. KUCHERENKO[1],
A.V.MURATOV[1], G. KARCZEWSKI[2], S. SCHREYECK[3]

Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[2]Institute of Physics of Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland
[3]University of Wurzburg, Germany

DEPENDENCES OF PLASMON AND IR PHONON FREQUENCIES ON TEMPERATURE IN $Pb_{1-X}Sn_XTe$ FILMs ON GaAs / CdTe SUBSTRATES

For the first time the temperature dependences of the TO phonons and the temperature of the structural phase transition in $Pb_{1-x}Sn_xTe$ films with x > 0.2 (x = 0.25 and 0.53) were determined from IR reflection spectra. It was found that in all studied films (x = 0.25, 0.53, 0.59), the plasma frequency increases with decreasing temperature, which is mainly due to the decrease of the effective mass of carriers and the transition of carriers from vortex states on the film surface to the valence band.

В узкозонных полупроводниках PbSnTe и SnTe происходит ферроэлектрический фазовый переход, когда при понижении температуры они проходят от высокотемпературной кубической фазы к

низкотемпературной ромбоэдрической. Причем PbTe остается кубическим вплоть до самых низких температур, при этом поперечный фонон (ТО фонон), связанный с относительным смещением подрешеток Pb и Te, “смягчается” (его частота уменьшается) при уменьшении температуры. В кристаллах SnTe с концентрацией дырок 10^{20} $см^{-3}$ фазовый переход происходит при 100 К [1]. При увеличении концентрации дырок температура фазового перехода понижается. Температуру фазового перехода можно определить из измерений спектров ИК отражения. В соединениях PbSnTe возникает сильная связь между межзонными электронными возбуждениями и поперечными колебаниями решетки. Из теории электрон – ТО фононного взаимодействия [1-3] следует, что частота ТО фонона (ν_{TO}) увеличивается при суммарном увеличении ширины запрещенной зоны и энергии Ферми. При большей концентрации олова точка инверсии зон сдвигается в сторону низких температур. Однако электронные и фононные свойства в объеме пленок с x > 0.2 мало изучены.

Задача наших исследований состояла в определении температурной зависимости поперечных колебательных мод (ТО фононов) в тонких пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (~ 60 нм) с x = 0.25, 0.53 и 0.59, полученных методом отражения в инфракрасной области спектра и в изучении температурной зависимости плазменных частот для вышеуказанных структур.

Спектры отражения измерялись на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125HR с разрешением 2 - 4 $см^{-1}$ в диапазоне частот 20 - 5500 $см^{-1}$ в интервале температур 5 – 300 К. Впервые из измерений ИК спектров отражения были определены температурные зависимости ТО фононов и температуры структурного фазового перехода в пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с x > 0.2 (x = 0.25 и 0.53). Было обнаружено, что во всех исследуемых пленках (x = 0.25, 0.53, 0.59) плазменная частота увеличивается при понижении температуры, что связано, главным образом, с уменьшением эффективной массы проводимости и переходом носителей из вихревых состояний на поверхности пленки в валентную зону.

Список литературы

1. Sugai S. et. al. // Sol. St. Com. 1977. V. 24. P. 407.
2. Kawamura H. et. al. // Sol. St. Com. 1974. V. 14. P. 259.
3. Kawamura H. et. al. // Sol. St. Com. 1975. V. 17. P. 341.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. ЧЕРНЫХ[1], С.С. ХАРИНЦЕВ[1,2]
[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
[2]*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

Гигантское комбинационное рассеяние света (TEPC) – перспективный метод для анализа полимерных пленок, где усиленное электромагнитное поле между зондом и образцом создает тепло [1], генерируемое на вершине зонда. Используя зонд как источник тепла, можно локально нагревать образец и определять температуру нагрева с высоким разрешением (до 10 нм). В нашей работе для определения температуры нагрева полимерной пленки необходимо было определить температуру нагрева зонда при его облучении светом разных длин волн. Для этого нами была смоделирована упрощенная модель, где в качестве зонда использовалась золотая наночастица радиусом 10 нм. Также была исследована зависимость температуры нагрева частицы в зависимости от длины волны падающего излучения.

E.A. CHERNYKH[1], S.S. KHARINTSEV[1,2]
[1]*Kazan Federal University*
[2]*Intitute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

NEAR-FIELD PHOTO-INDUCED HEATING OF POLYMER FILM

Tip-enhanced Raman Spectroscopy (TERS) is a promising method for the analysis of probe-sample (polymer) systems, where the amplified electromagnetic field between the probe and the sample creates heat [8] generated at the top of the probe. Using the probe as a heat source, it is possible to locally heat the sample and determine the heating temperature with high resolution (up to 10 nm). In our work, to determine the heating temperature of a polymer film, it was necessary to determine the heating temperature of the probe when it was irradiated with light of different wavelengths. To do this, we simulated a simplified model where a gold nanoparticle with a radius of 10 nm was used as a probe. The dependence of the particle heating temperature on the wavelength of the incident radiation was also investigated.

Моделирование для оценки температуры нагрева золотой наночастицы проводилось в два этапа с использованием программного обеспечения Lumerical. Первым этапом было моделирование и оценка мощности, поглощаемой наночастицей при ее облучении световым импульсом, с

помощью FDTD Lumerical (3D приложение для решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области). Была построена трёхмерная модель, где золотая наночастица радиусом 10 нм была помещена в стеклянный куб со стороной 1 мкм. На куб падала плоская волна (длительность импульса 10^6 фс) p–поляризации. Интенсивность падающего света составляла 1мВ/мкм^2. Размеры области моделирования составляли: 2 мкм (по x), 2 мкм (по y) и 0,58 мкм (по z). Вторым этапом было моделирование и оценка температуры нагрева золотой наночастицы с помощью DEVICE Lumerical (3D – приложение для решения уравнений теплопроводности методом конечных элементов). Здесь была построена аналогичная трёхмерная модель с идентичными размерами области моделирования, но дополнительно наночастица была помещена в воздушное пространство с размерами: 0,5 мкм (по x), 0,5 мкм (по y) и 0,4 мкм (по z).

Моделирование нагрева золотой наночастицы проводилось для длин волн видимого диапазона (375 – 689 нм). Была исследована зависимость температуры нагрева наночастицы в зависимости от длины волны падающего излучения. Максимальное изменение температуры нагрева соответствует 563 нм, что близко к длине волны, соответствующей плазмонному резонансу (516 нм), и составляет 81 К в случае теоретических рассчётов, и 67 К в случае моделирования. Разница в температурных значениях объясняется незначительным вытеканием тепла через незаизолированную грань при моделировании в DEVICE, что приводит к меньшим значениям температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РНФ (№19-12-00066).

Список литературы

1. Zhang W. et. al. // J. Phys. Chem. C. 2008. V. 112. P. 2104-2108.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. МАЛЫШЕВА, И.А. КОЛМЫЧЕК
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СПЕКТРОСКОПИЯ ФАЗЫ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ЗОЛОТЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ

Приведены результаты экспериментов по спектроскопии фазы второй гармоники методом нелинейно-оптической интерферометрии в гиперболических метаматериалах на основе золотых наностержней в матрице оксида алюминия. Обнаружен скачок фазы квадратичного нелинейно-оптического сигнала в спектральной окрестности точки Epsilon-Near-Zero.

I.V. MALYSHEVA, I.A. KOLMYCHEK
Lomonosov Moscow State University

SECOND HARMONIC PHASE SPECTROSCOPY IN HYPERBOLIC METAMATERIALS BASED ON GOLD NANORODS

Results of the second harmonic phase spectroscopy, performed by means of nonlinear interferometry technique, for hyperbolic metamaterials are presented. The samples are gold nanorods' arrays in alumina matrix. We observed a leap of the phase of the quadratic nonlinear response in the spectral vicinity of the Epsilon-Near-Zero point.

Гиперболическими метаматериалами (ГММ) называют композитные искусственные наноструктурированные материалы, в которых поперечная и продольная составляющие тензора диэлектрической и/или магнитной проницаемостей имеют противоположные знаки [1]. Уникальные свойства ГММ обусловлены возникновением полюса эффективной диэлектрической проницаемости – Epsilon-Near-Pole (ENP), а также, сменой знака действительной части компоненты тензора диэлектрической проницаемости при прохождении её через нулевое значение – Epsilon-Near-Zero (ENZ) [2]. В спектральной окрестности этих точек возможно наблюдение необычных оптических и нелинейно-оптических эффектов. Так, в точке ENZ из граничных условий для вектора электрической индукции следует сингулярность нормальной компоненты напряженности, что приводит, в том числе, к увеличению интенсивности генерации второй гармоники (ВГ). Целью работы является спектроскопия фазы ВГ в ГММ в окрестности точки ENZ, при различных углах падения

света на структуру θ. Образцы, изготовленные на Химическом факультете МГУ методом электрохимического травления алюминия с последующим электроосаждением золота в поры, представляют собой массивы металлических наностержней в матрице анодного оксида алюминия. Согласно РЭМ-изображениям диаметр наностержней составляет 40 ±4 нм, длина 580 нм, расстояние между их осями 101 ± 8 нм. Экспериментальные данные получены методом нелинейно-оптической интерферометрии, описанном в [3], с использованием фемтосекундного лазера Ti:Sapphire с длиной волны, перестраиваемой в пределах от 730 до 900 нм. В качестве референсного источника ВГ использовалась пленка ITO.

Проведенные ранее исследования спектральных характеристик образцов показали, что ENZ наблюдается при длине волны 820 нм, таким образом, при $\lambda > 820$ нм реализуется гиперболический закон дисперсии [4]. В доступном диапазоне длин волн при различных углах падения были измерены интерферограммы ВГ (пример – рис. 1), которые затем аппроксимировались функцией $I_{2w} \propto A + I_0 cos(2\pi z/d(\lambda) + \varphi(\lambda))$, где z – координата плёнки ITO, φ(λ) – фаза. На рис. 2 приведён полученный спектр φ(λ) для θ = 25°. Наблюдается быстрое изменение фазы ВГ в спектральной окрестности ENZ, превышающее 100 °, при изменении длины волны на 100 нм. Аналогичные результаты получены при других углах падения p-поляризованного света на ГММ, что связано с сильной дисперсией констант распространения в спектральной окрестности ENZ.

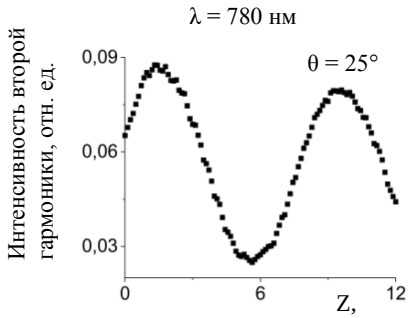


Рис. 1. Интерферограмма ВГ

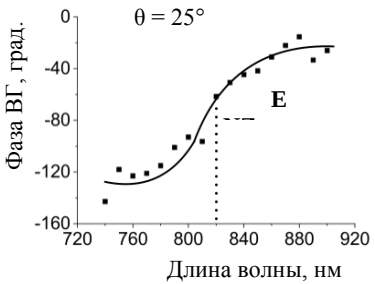


Рис. 2. Спектр φ(λ) для θ = 25 °

Список литературы

1. Poddubny A., Iorsh I. et. al.// Nat. Photonics. 2013. V. 7, P. 948.
2. Shekhar P., Atkinson J. et. al. // Nanoconvergence. 2014. V. 1, P. 1.
3. Kolmychek I.,Bykov A. et. al. // Optics Letters . 2015. V. 27. P. 32069.
4. Kolmychek I., Pomozov A. et. al. // Opt. Lett. 2018. V. 43. P. 3917.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ХАНКАЕВ, Д.А. АРТАМОНОВ, А.В. ЦИБУЛЬНИКОВА, В.А. СЛЕЖКИН[1], И.Г. САМУСЕВ, В.В. БРЮХАНОВ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград
[1]Калининградский государственный технический университет

ФУНКЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНОВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В настоящей работе представлено исследование оптических свойств поверхности титана, модифицированного периодическими структурами, нанесенными фемтосекундным лазерным излучением. Методом эллипсометрии получены спектры диэлектрической проницаемости и спектры отражения поверхностей.

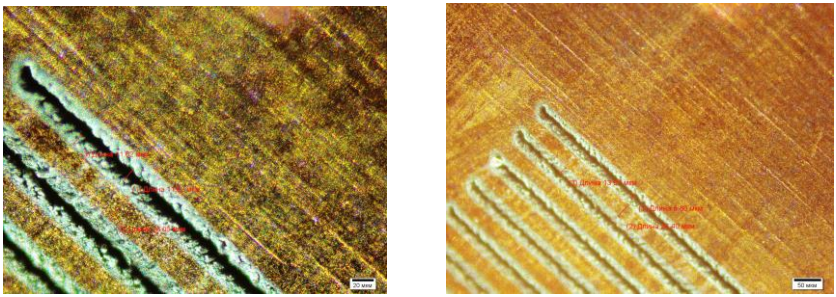
A.A. KHANKAEV, D.A. ARTAMONOV, A.V. TCIBULNIKOVA, V.A. SLEZHKIN[1], I.G. SAMUSEV, V.V. BRYUKHANOV
Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad
[1]Kaliningrad State Technical University

DIELECTRIC PERMITTIVITY FUNCTIONS OF NANOSTRUCTURED TITANIUM SURFACES

The optical properties of the titanium surface modified by periodic structures fabricated by femtosecond laser radiation are presented in this work. The dielectric permittivity spectra and reflection spectra of titanium surfaces were obtained by ellipsometry method.

В представленной работе лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (LIPSS) на поверхности титана были получены фемтосекундным излучением лазера при следующих параметрах: центральная длина волны лазера $\lambda = 1030$ нм, частота следования импульсов $\nu = 25$ кГц, энергия лазера $E = 7$ мкДж. Перемещение титанового образа осуществлялось с помощью столика и контролировалось программным обеспечением Xilab. На рис. 1 представлен рельеф полученных структур, который был измерен на люминесцентном микроскопе BX43. На рис. 1*а* изображен рельеф поверхности титана, полученный фемтосекундным излучением при скорости перемещения столика 200 мкм/с. Из рисунка видно, что ширина данной структуры составила 11,62 мкм. Помимо этого, присутствует

область оплавления поверхности титана, ширина которой составила 11,62 мкм. Расстояние между полученными полосами составляет 26,05 мкм. На рис. 1*б* изображен рельеф поверхности титана, полученный фемтосекундным излучением при скорости смещения образца 300 мкм/с.

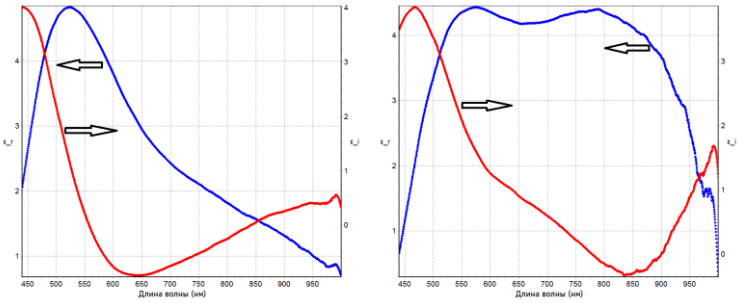


а *б*

Рис. 1 Рельеф лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на титане при скорости перемещения столика 200 мкм/с (*а*) и 300 мкм/с (*б*)

Также присутствует область оплавления ширина, которой 13,67 мкм. Расстояние между полученными полосами составляет 28,4 мкм.

На рис. 2 представлены спектры диэлектрической проницаемости титановых микро/наноструктурированых поверхностей. Из рис. 2*а* видно, что действительная компонента диэлектрической проницаемости принимает положительные значения во всей области видимого спектра и имеет максимум на длине волны 525 нм. На рис. 2*б* действительная компонента диэлектрической проницаемости положительна и имеет два максимума на длинах волн 570 нм и 780 нм.



а *б*

Рис. 2. Спектры диэлектрической проницаемости титановых модифицированных поверхностей

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ШИРОКОВА, А.В. МАСЛОВ, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

АДИАБАТИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЛАЗМОНА НА ПОВЕРХНОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГРАФЕНА

Для описания эволюции поверхностного плазмона, направляемого листом графена с медленно изменяющейся во времени плотностью свободных носителей, получены сохраняющие свое значение комбинации энергии и частоты плазмона (адиабатические инварианты). Адиабатические инварианты имеют различный вид для случаев генерации и рекомбинации носителей, однако в обоих случаях предсказывают, что сдвиг частоты плазмона сопровождается уменьшением его энергии.

A.V. SHIROKOVA, A.V. MASLOV, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

ADIABATIC TRANSFORMATION OF A SURFACE PLASMON ON TEMPORALLY DYNAMIC GRAPHENE

For surface plasmons on graphene, combinations of the plasmon energy and frequency (adiabatic invariants) that are conserved during slow time-variations of the graphene free carrier density are obtained. The invariants have a different form in the cases of recombination and generation carrier density. In both cases, however, they predict that plasmon frequency shifting is accompanied by a decrease of the plasmon energy.

Графен – перспективный материал для активной плазмоники терагерцового и инфракрасного диапазонов частот благодаря его способности поддерживать сильно локализованные и слабо затухающие поверхностные плазмоны, характеристиками которых можно эффективно управлять (как электрически, так и оптически) путем изменения плотности носителей в графене. Трансформация графеновых плазмонов при ступенчатом изменении плотности носителей в графене была исследована в недавних работах [1-4]. В данной работе рассматривается более реалистичная ситуация адиабатической эволюции плазмона при медленном (по сравнению с периодом плазмона) изменении плотности носителей в графене. Для описания такой эволюции получены комбинации энергии и частоты плазмона (адиабатические инварианты), которые остаются постоянными при изменении плотности носителей.

Рассмотрение проводится на основе уравнений Максвелла для полей и уравнения Друде во временной форме для графена с использованием подхода, развитого в работе [5]. Получены адиабатические инварианты следующего вида: $W\omega = \text{const}$ – для случая возрастания во времени плотности носителей $N(t)$ и $W\omega^{-1} = \text{const}$ – для случая убывания плотности. Изменение частоты плазмона можно найти из дисперсионного уравнения плазмона и условия сохранения его волнового числа [1-5]. Частота увеличивается при возрастании плотности носителей и уменьшается при убывании (рис. 1). Как следует из адиабатических инвариантов, энергия плазмона в обоих случаях уменьшается.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No. 3.3854.2017/4.6.)

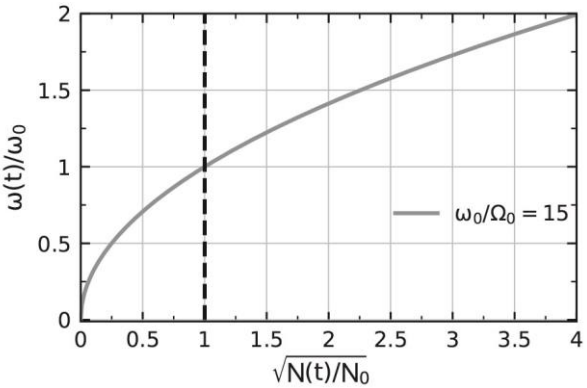


Рис. 1. Частота плазмона в зависимости
от плотности носителей в графене (и частота,
и плотность нормированы на начальные значения)

Список литературы

1. Menendez G.A., Maes B. // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 5006-5009.
2. Wilson J., Santosa F., Min M., Low F // Phys. Rev B. 2018. V. 98. P. 081411(R).
3. Maslov A.V., Bakunov M.I. // Optica. 2018. V. 5. P. 1508-1515.
4. Shirokova A.V., Maslov A.V., Bakunov M.I. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 045424.
5. Bakunov M.I., Gildenburg V.B., Zhukov S.N., Zharova N.A. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 1035-1043.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ТРУБАЕВ, В.С. МАКИН[1,2]
Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), Москва
[1]Институт ядерной энергетики СПбПУ, Сосновый Бор
[2]Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения - филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВОЗБУЖДЕНЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИЖАТОЙ ВОЛНЫ

Приведены результаты расчета температурной зависимости интенсивности прижатой волны (ПВ), распространяющейся по поверхности металла. Расчетные данные сравниваются с экспериментальными значениями.

V.V. TRUBAEV, V.S. MAKIN[1,2]
Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow
[1]Institute for Nuclear Energetic, Sosnovy Bor, Leningrad region
[2]Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes - Branch of JSC «Kometa Corporation», Saint-Petersburg

TEMPERATURE DEPENDENCE OF PRESSED WAVE GENERATION AND PROPAGATION

Numerical results for temperature dependence of pressed wave intensity on metal surface are presented. Numerical data are compared with experimental values.

В работе [1] изучалось влияние температуры металла на распространение поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), возбуждаемой лучом CO_2 лазера. Возбуждение и детектирование ПЭВ осуществлялось с помощью дифракционных решеток, нарезанных на поверхности металла. При этом предполагалось, что на гладком участке поверхности генерируется ПЭВ. Однако в работе [2] было показано, что в условиях возбуждения ПЭВ решеткой ввода вдоль гладкого участка поверхности распространяется излучение, существенно отличающееся от поля ПЭВ. Это излучение было названо прижатой волной (ПВ). Профиль поля ПВ существенно отличается от профиля поля ПЭВ. Это отличие является следствием того, что из-за конечности ширины решетки ввода, волна, идущая вдоль гладкого участка поверхности, представляет волновой пакет, составляющими которого являются как эванесцентные, так и объемные волны.

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры металла на возбуждение и распространение ПВ при возбуждении решеткой ввода. Напряженность поля в ПВ рассчитывается численно с использованием формул, представленным в [2]. Для того, чтобы сравнить результаты численных расчетов с экспериментальными данными, представленными в [1], в качестве металла, для которого проводится расчет, было выбрано золото. В экспериментах, описанных в [1], золото было выбрано благодаря его свойству не окисляться на воздухе даже при повышении температуры. В [1] измерение температурной зависимости проводилось в диапазоне температур от 20 до 140 °С. В этом же диапазоне температур проводился и расчет температурной зависимости для ПВ.

Зависимость напряженности поля ПВ от температуры обусловлено тем, что от температуры зависит комплексная диэлектрическая проницаемость металла. В [1] предполагалось, что интенсивность возбуждаемой поверхностной волны на выходе решетки ввода не зависит от температуры металла. Проведенные нами расчеты показали, что интенсивность ПВ на выходе решетки ввода действительно не зависит от температуры металла, по крайней мере в том диапазоне температур, в котором проводились измерения. Что касается численных результатов для температурной зависимости распространения ПВ, то экспериментальные точки, характеризующие эту зависимость, очень хорошо ложатся на расчетную кривую, которая в данном случае представляет прямую линию.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод. Хотя профиль поля ПВ в отличие от ПЭВ изменяется при распространении ПВ вдоль гладкой поверхности металла, некоторые характеристики поля ПВ можно использовать для определения оптических характеристик металлов. В частности, измеряя температурную зависимость поля ПВ, можно оценить такие параметры металла, как плазменная частота и частота столкновений электронов с фононами. Следует также отметить, что измерение температурной зависимости сигнала, идущего с решетки вывода ПВ, позволяет не учитывать тот факт, что профиль поля ПВ изменяется по мере распространения ПВ по гладкому участку поверхности. Так как решетка вывода ПВ фиксирована, то профиль поля ПВ в точке нахождения решетки вывода остается неизменным. Таким образом, изменение величины сигнала, идущего с решетки вывода, будет определяться только температурной зависимостью поля ПВ, а не изменением профиля поля с изменением расстояния между решетками.

Список литературы

1. Бонч-Бруевич А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, Вып. 4, С. 193-197.
2. Либенсон М.Н. и др. //Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 76. № 1. С. 76-78.

УДК 535(06)+004(06)

В.М. СТЯПШИН, А.С. САУШИН, Г.М. МИХЕЕВ
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ Ag/Pd НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК НА ФОРМУ ИМПУЛЬСОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ФОТОТОКА

Приведены результаты экспериментов по генерации поляризационно-чувствительного фототока в образцах серебро-палладиевых нанокомпозитных плёнок при облучении наклонно падающим фемтосекундным лазерным излучением. Установлена зависимость временных параметров генерируемых импульсов фототока от структуры плёнок, обусловленной составом конструкционной составляющей и температурой вжигания.

V.M. STYAPSHIN, A.S. SAUSHIN, G.M. MIKHEEV
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk

INFLUENCE OF Ag/Pd NANOCOMPOSITE FILMS STRUCTURE ON THE SHAPE OF POLARIZATION-SENSITIVE PHOTOCURRENT PULSES

The experimental results on the generation of polarization-sensitive photocurrent pulses in the silver-palladium nanocomposite films under obliquely incident femtosecond laser irradiation are presented. The dependence of the time parameters of the generated photocurrent pulses on the structure of the films, determined by the composition of the structural component and the firing temperature, is established.

В хорошо известных из электроники серебро-палладиевых (Ag/Pd) нанокомпозитных плёнках под воздействием наносекундного и фемтосекундного лазерного излучения генерируются зависящие от направления волнового вектора наносекундные импульсы поляризационно-чувствительного фототока [1, 2]. Генерация происходит в широком спектральном диапазоне (266-3500 нм) падающего излучения [3, 4] вследствие эффекта увлечения (ЭУ) и поверхностного фотогальванического эффекта (ПФГЭ). В общем случае временная форма фототока, генерируемого вследствие ЭУ и ПФГЭ, способна повторять временную форму возбуждающего наносекундного лазерного импульса. Однако в виду обусловленных фазовым составом и структурой Ag/Pd плёнок особенностей их электрической проводимости, регистрируемые импульсы фототока существенно длиннее падающих. Задачей данного

исследования являлось изучение влияния структуры плёнок на форму импульсов поляризационно-чувствительного фототока.

Фототок возбуждался излучением фемтосекундного лазера с длиной волны 795 нм и длительностью импульсов 120 фс. Исследовались образцы плёнок, полученные из паст одинаковой марки, но с различным составом конструкционной составляющей – стеклянной фритты, которая плавится при вжигании пасты и обволакивает частицы функциональной компоненты. На рис. 1 показаны осциллограммы импульсов фототока, генерируемого в изготовленных при различных температурах вжигания Ag/Pd плёнках, имеющих в своём составе стекло марки СЦ-273.

Видно, что передний фронт этих импульсов практически идентичен, однако задний фронт для плёнки, изготовленной при 500°C, существенно растянут по сравнению с более высокотемпературным образцом. Длительность импульсов по полувысоте составляет 24 и 3,3 нс в первом и во втором случае соответственно. РЭМ-изображения Ag/Pd плёнок говорят о существенном влиянии температуры вжигания на их структуру, а через это и на форму импульсов фототока, что подтверждается данными, полученными на образцах с более легкоплавким стеклом в своём составе.

Исследование финансово поддержано РФФИ (проект № 18-32-00224).

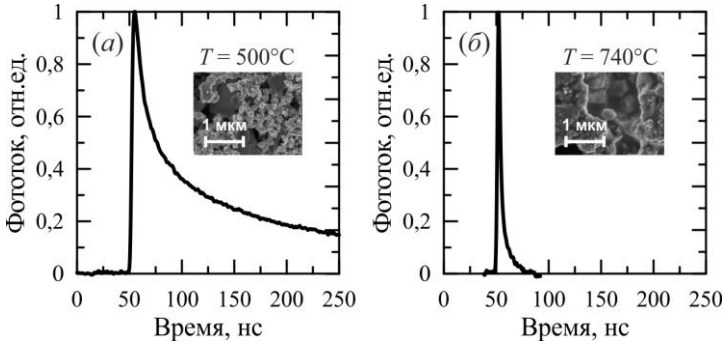


Рис. 1. Осциллограммы импульсов фототока в Ag/Pd плёнках, изготовленных при температуре 500°C (*а*) и 740°C (*б*), полученные при *p*-поляризации падающего излучения, а также РЭМ-изображения поверхности плёнок (во вставках)

Список литературы

1. Mikheev G.M., Zonov R.G., Aleksandrov V.A. // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. P. 675-678.
2. Mikheev G.M., Saushin A.S., Vanyukov V.V., Mikheev K.G., Svirko Y.P. // Nanoscale Res. Lett. 2017. V. 12. P. 39.
3. Mikheev G.M., Saushin A.S., Vanyukov V.V. // Quantum Electron. 2015. V. 45. P. 635-639.
4. Mikheev G.M., Saushin A.S., Styapshin V.M., Svirko Y.P. // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 8644.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОРОЛЕВА, М.Н. МАРТЫШОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

В работе проведено исследование полупроводниковых нанокристаллических оксидов металлов (NiO, WO_3, Co_3O_4) методом ИК-спектроскопии. Изучаемые образцы изготовлены с помощью метода электроспиннинга. Исследование проводилось в среднем ИК-диапазоне. Проведено отнесение полученных в спектрах полос поглощения.

A.V. KOROLEVA, M.N. MARTYSHOV
Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF NANOCRYSTALLINE METAL OXIDES BY IR SPECTROSCOPY

Semiconductor nanocrystalline metal oxides (NiO, WO_3, Co_3O_4) were investigated by IR spectroscopy. The studied samples were made using the electrospinning method. The investigation was conducted in the mid-IR range. The assignment of the absorption bands obtained in the spectra was carried out.

Интерес к исследованию нанокристаллических оксидов металлов обусловлен их широким применением в различных областях. Они применяются для создания катализаторов, газовых сенсоров, дисплеев, аккумуляторных батарей, биосенсоров.

Целью работы является исследование структурных особенностей нанокристаллических оксидов металлов (NiO, WO_3, Co_3O_4) при помощи метода ИК-спектроскопии. Для интерпретации полученных результатов было проведено отнесение полученных в спектрах полос поглощения.

Для оксида никеля NiO полоса при 420 см$^{-1}$ отнесена к колебаниям связи Ni - O. Полоса поглощения при 1029 см$^{-1}$ соответствует валентному колебанию связи C - O. Полоса при 1403 см$^{-1}$ отнесена к валентному колебанию связи O – C = O. Полоса при 1619 см$^{-1}$ относится к деформационному колебанию молекулы воды. Полосы поглощения при 1718, 2848 и 2919 см$^{-1}$ соответствуют остаткам органических соединений. Полоса при 3415 см$^{-1}$ отнесена к валентным колебаниям связи O - H (рис. 1). Для оксида вольфрама WO_3 полосы поглощения при 775 и 1058 см$^{-1}$ отнесены к колебаниям связи W - O. Полосы при 1536, 1600,

1700 см$^{-1}$ соответствуют колебаниям С - Н. Полоса поглощения при 2335 см$^{-1}$ отнесена к колебаниям молекулы CO_2 (рис. 2). Для оксида кобальта Co_3O_4 полосы поглощения при 393, 561, 659 см$^{-1}$ отнесены к колебаниям связи Co - O. Полоса при 561 см$^{-1}$ относится к валентному колебанию Co^{+III} - O, полоса при 659 см$^{-1}$ соответствует валентному колебанию Co^{+II} - O. Полоса при 867 см$^{-1}$ отнесена к обертону (рис. 3). Полученные результаты находятся в соответствии с результатами полученными другими авторами [1-4].

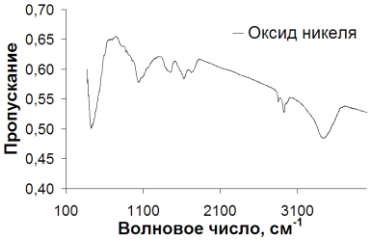


Рис. 1. ИК-спектр оксида никеля

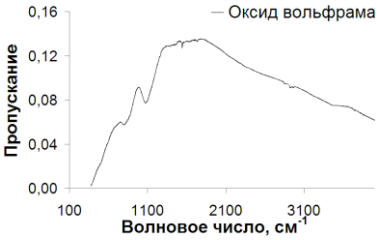


Рис. 2. ИК-спектр оксида вольфрама

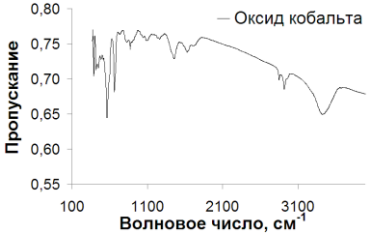


Рис. 3. ИК-спектр оксида кобальта

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-20101 мол_а_вед.

Список литературы

1. El-Kemary M., Nagy N., El-Mehasseb I. // Mater. Scien. Semicon. Proc. 2013. V. 16. P. 1747-1752.

2. Daniel M.F., Desbat B., Lassegues J.C. // J. Sol. Stat. Chem. 1988. V. 73. P. 127-139.

3. Makhlouf S.A., Bakr Z.H., Aly K.I., Moustafa M.S. // Superlat. and Microstruc. 2013. V. 64. P. 107-117.

4. Preudhomme J. Tarte P. // Spectrochimica Acta. 1971. V. 27A. P. 1817-1835.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. МАТРОСОВА[1,2], С.К. ЕВСТРОПЬЕВ[2,3], В.А. АСЕЕВ[2], В.В. ДЕМИДОВ[1], Н.К. КУЗЬМЕНКО[2], В.А. АНАНЬЕВ[1,2], Н.В. НИКОНОРОВ[2]

[1]Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

АКТИВНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА И НАНОКРИСТАЛЛОВ YAG:Nd^{3+}

Приведены данные о разработке метода получения активных оптических элементов на основе концепции кварцевых микроканальных структур. Показано, что пропитка преформ таких структур растворами $Y(NO_3)_2$, $Al(NO_3)_2$, $NdCl_3$ и поливинилпирролидона с последующей сушкой и термообработкой при температуре 1100 °C позволяет вытягивать при температуре 2000 °C волоконные световоды с нанокристаллами YAG:Nd^{3+} размером около 30 нм, имеющими пик излучения на длине волны 1064 нм.

A.S. MATROSOVA[1,2], S.K. EVSTROPIEV[2,3], V.A. ASEEV[2], V.V. DEMIDOV[1], N.K. KUZMENKO[2], V.A. ANANYEV[1,2], N.V. NIKONOROV[2]

[1]S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg
[2]ITMO University, Saint-Petersburg
[3]Saint-Petersburg State Institute of Technology

ACTIVE OPTICAL FIBERS BASED ON SILICA GLASS AND YAG:Nd^{3+} NANOCRYSTALS TECHNOLOGY

The data on the development of a method of producing active optical elements based on the conception of silica microstructured fibers are presented. It is shown that impregnation of the preforms of such fibers with $Y(NO_3)_2$, $Al(NO_3)_2$, $NdCl_3$ and polyvinylpyrrolidone solutions, followed by drying and heat treatment at 1100 °C, makes it possible to draw at 2000 °C fibers with YAG:Nd^{3+} nanocrystals of about 30 nm in size having the main emission peak at the wavelength of 1064 nm.

Цель работы заключалась в получении прототипа активного оптического элемента из кварцевого стекла, в состав которого введены высоколюминесцентные нанокристаллы алюмоиттриевого граната (YAG), легированного ионами неодима (Nd^{3+}), перспективного для применения в

мощных лазерах и усилителях. Идея состояла в использовании преформы микроструктурированного волоконного световода (ВС), каналы которой содержат предварительно синтезированные нанокристаллы YAG:Nd^{3+} сравнительного малого размера.

Технологический процесс получения оптического элемента включал следующие операции: 1) приготовление однородного пленкообразующего раствора на основе $Y(NO_3)_2$, $Al(NO_3)_2$, $NdCl_3$ и поливинилпирролидона, обладающего высокой адгезионной способностью с поверхностью кварцевого стекла; 2) пропитка раствором каналов очищенной от примесей преформы микроструктурированного ВС; 3) сушка и термообработка пропитанной раствором преформы при температуре 1100 °С; 4) перетягивание преформы в ВС при температуре 2000 °С.

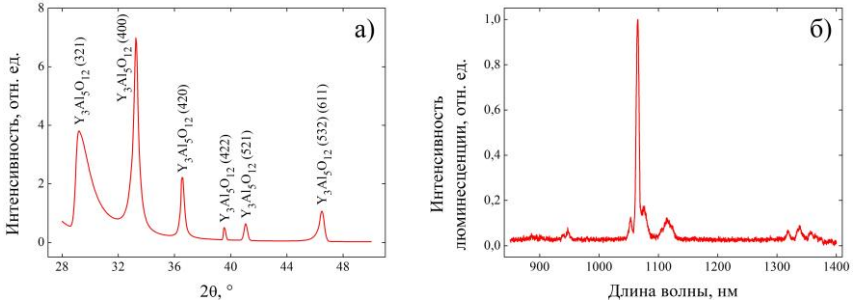


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа (а) и спектр люминесценции (б) вытянутого ВС с нанокристаллами YAG:Nd^{3+}

Рис. 1а показывает наличие ориентированных нанокристаллов YAG:Nd^{3+} в составе вытянутого ВС. Это свидетельствует о том, что нанокристаллы со средним размером около 30 нм (для оценки размеров использовался метод Дебая-Шеррера), предварительно сформированные в каналах преформы при температуре 1100 °С, сохранились в матрице кварцевого стекла в процессе повторной термообработки (вытягивания) при температуре 2000 °С. Форма представленного на рис. 1б спектра люминесценции ВС характерна для кристаллов YAG:Nd и практически идентична таковой для объемных материалов. Основной пик излучения на длине волны 1064 нм соответствует электронному переходу $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Время затухания люминесценции, измеренное при передаче лазерных импульсов длительностью 10 нс, составило 248 мкс, что сопоставимо с аналогичным параметром для объемного кристалла (292 мкс).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00596).

УДК 535(06)+004(06)

Г.А. ЗАРЕЦКАЯ, А.В. ДРОЗДОВСКИЙ, Н.А. ЧЕПЛАГИН
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Приведена аналитическая теория, описывающая характеристики передачи интегральной структуры, состоящей из микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором. В качестве примера представлены результаты расчёта характеристик передачи интегрального кольцевого оптического резонатора из нитрида кремния.

G.A. ZARETSKAYA, A.V. DROZDOVSKIY, N.A. CHEPLAGIN
Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

TRANSFER FUNCTION OF INTEGRATED RING RESONATOR

The analytical theory for transmission charactericsics of ring resonator-loaded waveguides is put forward. The problem is illustrated by the calculation of the transfer function of the silicon nitride integrated ring resonator.

В последнее десятилетие интегральные резонаторы на основе оптических волноводов нашли широкое применение в таких областях, как интегральная оптика и радиофотоника. Одной из основных задач при проектировании таких резонаторов является учет влияния области связи резонатора с подводящей и отводящей линиями на его характеристику передачи.

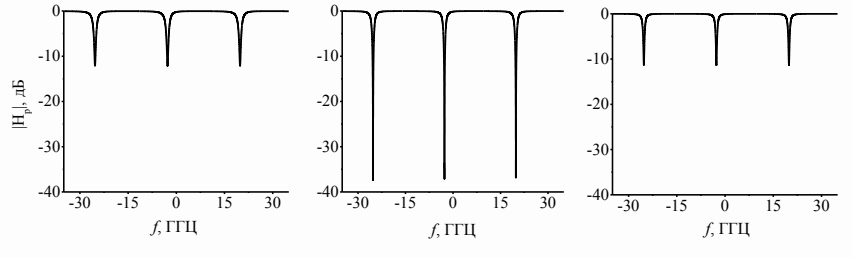
Целью данной работы являлась разработка аналитической теории, описывающей характеристики передачи интегральной структуры, состоящей из микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором. Предлагаемая теория строилась на аналитической теории потерь интегральных оптических волноводов [1], решения которой в дальнейшем использовались как элементы разложения по собственным модам с последующим применением к ним модифицированной теории связанных волн с введением эффективных источников возбуждения в терминах ортогональных дополнительных полей [2]. В ходе решения задачи было принято условие, что радиус кольцевого резонатора много больше длины волны оптического излучения в рассматриваемом волноводе, то есть в области связи волноводы почти параллельны. Тогда, электромагнитные поля в волноводах могут быть представлены модальными полями в

регулярном базовом не искривлённом волноводе. Для упрощения математической задачи использовались уравнения связанных волн для случая параллельных волноводов, состоящих из k отрезков. При этом начальная амплитуда на каждом отрезке была равна конечной амплитуде на предыдущем. Итоговое значение коэффициента передачи исследуемой структуры определялось следующим выражением:

$$\dot{H}_{ring} = k_{11} + k_{12}{}^2 \cdot e^{-i\gamma L_{ring}} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(k_{11} \cdot e^{-i\gamma L_{ring}}\right)^k\right). \qquad (1)$$

где γ – комплексная постоянная распространения, учитывающая дисперсию и потери оптического микроволновода, L_{ring} – длина кольцевого резонатора, k_{11} и k_{12} – значения коэффициентов передачи по амплитуде на выходе из области связи (коэффициенты связи).

Результаты расчета частотной зависимости коэффициента передачи при различном значении расстояния между оптическим волноводом и кольцевым резонатором приведены на рис. 1. Материалом волноводов являлся Si_3N_4, а материалом окружающего пространства – SiO_2. Размеры поперечного сечения волноводов в структуре составляли 1,5 х 0,7 мкм. При расчетах за частоту 0 ГГц выбрана частота, соответствующая длине волны 1,55 мкм, значение декремента затухания волноводов составляло 1 дБ/см. Представленные частотные зависимости коэффициента передачи характеризуют работу резонатора в трёх характерных режимах: в режиме недосвязи (рис. 1*а*), в близком к критическому режиму (рис. 1*б*) и в режиме пересвязи (рис. 1*в*).



а *б* *в*

Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента передачи оптического волновода, нагруженного кольцевым резонатором: g = 350 нм (*а*), 400 нм (*б*), 450 нм (*в*)

Список литературы

1. Zaretskaya G.A., Drozdovskii A.V. // V International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2019). 2019. V. 1. P. 218-222.

2. Barybin A.A., Dmitriev V.A. // Princeton (NJ) : Rinton Press, 2002.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Э. НИКОЛАЕВ, С.В. ПАВЛОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА
Российский университет дружбы народов, Москва

ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Рассмотрен четырёхслойный оптический волновод, состоящий из диффузионного слоя на подложке и дополнительного однородного слоя. Выявлены особенности дисперсионных характеристик в виде горизонтального участка, зависящего от параметров волноводной системы, исследовано распределение мощности волноводных мод по слоям структуры.

N.E. NIKOLAEV, S.V. PAVLOV, T.K. CHEKHLOVA
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

FEATURES OF DISPERSION CHARACTERISTICS OF MULTILAYER OPTICAL WAVEGUIDES

A 4-layer optical waveguide consisting of a diffusion layer on a substrate and an additional homogeneous layer is considered. Features of dispersion characteristics in the form of a horizontal section, depending on the parameters of the waveguide system, are revealed. The waveguide modes power distribution over the layers of the structure is investigated.

Использование многослойных волноводных структур позволяет решить многие проблемы при создании тех или иных функциональных элементов фотоники и интегральной оптики, например, при сопряжении интегрально-оптических схем с электронными схемами, для подстройки параметров отдельных элементов для оптимальной работы всей схемы. Используя материалы с разным температурным оптическим коэффициентом, можно осуществлять с хорошей точностью температурную подстройку параметров оптических устройств [1]. Оптимизация параметров четырёхслойных волноводов для практического использования требует детального исследования их характеристик

В настоящей работе были рассмотрены дисперсионные характеристики четырёхслойного планарного волновода, состоящего из двух слоёв: диффузионного слоя на подложке и однородного слоя, нанесённого на поверхность диффузионного. Технология формирования диффузионных волноводов даёт возможность варьировать их параметры,

изменяя параметры технологического режима, такие как количество диффузанта на поверхности подложки, температура и время отжига.

Исследования производились на основе метода формул сдвига (МФС) [2], в соответствии с которым функции поля моды неоднородного волновода рассматриваются в виде суммы соответствующих функций нескольких однородных волноводов сравнения. Благодаря применению удобной математической модели для описания профиля показателя преломления (ПП) неоднородного волновода процедура моделирования может быть использована для расчёта дисперсионных характеристик волноводов с самыми разными профилями.

Получены дисперсионные характеристики для волноводов с определёнными значениями ПП на поверхности диффузионного слоя и ПП дополнительного однородного слоя при его фиксированной толщине.

Характеристики обладают рядом отличительных особенностей. В частности, они имеют горизонтальный участок, соответствующий тому, что эффективный показатель преломления остаётся почти постоянным при изменении толщины волновода. По-видимому, это обусловлено конкуренцией влияния двух слоёв, каждый из которых при определённых параметрах может стать волноведущим. Степень конкуренции зависит от распределения поля в волноводной системе.

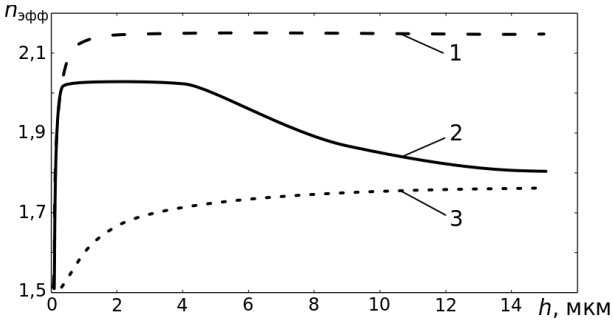


Рис. 1. Дисперсионные зависимости: 1 – для трёхслойного однородного волновода (n_2 = 2,15); 2 – для исследуемого четырёхслойного волновода; 3 – для трёхслойного диффузионного волновода (n_3 = 1,84); ПП подложки – n_4 = 1,514

Список литературы

1. Николаев Н.Э., Павлов С.В., Чехлова Т.К. Особенности распространения электромагнитных волн в оптических золь-гель волноводах при изменении температуры // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1149-1152.

2. Николаев Н.Э., Шевченко В.В. Метод формул сдвига в применении к заглублённым планарным оптическим волноводам // РЭ. 1997. Т. 42. № 8. С. 901-903.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ, А.И. АЛЕКСАНДРОВА
Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ПРИ ИЗГИБАХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В работе исследовано изменение характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна при изгибах одномодового оптического волокна. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований при различных диаметрах изгиба.

I.V. BOGACHKOV, A.I. ALEKSANDROVA
Omsk State Technical University

RESEARCH OF BRILLOUIN REFLECTOGRAMS AT BENDS IN OPTICAL FIBERS

A variation of the characteristics of a Mandelstam – Brillouin scattering at the bends of the single-mode optical fiber is researched. The results of theoretical and experimental studies at different diameters of bends are proposed.

Для обеспечения долговременного функционирования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) необходимо оценивать надежность ВОЛС и проводить раннюю диагностику её оптических волокон (ОВ).

С целью выявления участков ОВ с повышенными механическими напряжениями и с измененной температурой можно использовать бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (БОИР), механизм действия которых основан на анализе спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ). Известно, что компоненты РМБ (бриллюэновский сдвиг частоты (БСЧ) – частота максимума спектра РМБ (СРМБ)) имеют прямо пропорциональную зависимость от температуры и продольного натяжения ОВ. Изгиб вносит оптические потери в ОВ, увеличивающиеся с кривизной ОВ, при этом в нём деформируется оптическая мода, смещающаяся от оси волокна [1]. Изгиб вызывает деформацию в поперечном сечении волокна так, что ОВ испытывает сжатия на одной стороне ОВ (к центру изгиба), в то время как другая сторона подвергается растяжению [2]. В изогнутом ОВ смещение оптического луча, вызванного кривизной, в сочетании с распределением натяжения, вызванным изгибом, приводит к изменению БСЧ.

Проведём анализ влияния изгиба одномодового ОВ на БСЧ. Боковое смещение оптического поля из-за изгиба ОВ определяется формулой [1]:

$$d = \frac{a^2 V^2}{4\Delta R}(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})^4 , \qquad (1)$$

где a – радиус сердцевины ОВ; R – радиус кривизны ОВ; V – нормированная частота ($V = kan_1\sqrt{\Delta}$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в свободном пространстве, $\Delta = 1-(n_2/n_1)^2$, $n = n_{1,2}$ – показатели преломления сердцевины и оболочки.

На рис. 1*а* показано смещение пучка, рассчитанного с помощью уравнения (1) при λ = 1550 нм, a = 4.1 мкм, n_1 = 1.45 и Δ = 0.0072 в зависимости от радиуса изгиба ОВ (от 1 см до 5 см).

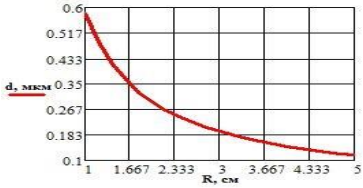
По результатам моделирования видно, что с уменьшением радиуса кривизны ОВ распределение оптического поля смещается от центра кривизны оси ОВ. Из механики твёрдого тела известно, что растяжение, вызванное изгибом радиусом R, задается выражением [1]:

$$\varepsilon = (1/R)\,y , \qquad (2)$$

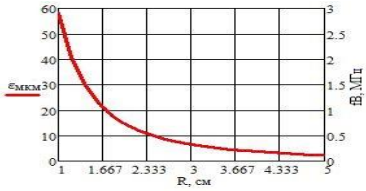
где y – расстояние от оси ОВ, взятое вдоль направления изгиба.

На рис. 1*б* (левая ось) показан график изменения натяжения из-за изгиба, а на правой оси рис. 1*б* – изменения БСЧ.

Анализ показал, что изгиб радиусом в несколько *см* приводит к незначительному изменению БСЧ. Натяжение при изгибе на рис. 1б отличается от осевого (продольного – из-за удлинения/сжатия вдоль оси ОВ) натяжения. Изменение БСЧ, вызванное изгибом из-за совместного влияния смещения оптического пучка и растяжения, составляет единицы МГц, и поскольку БОИР регистрирует «усреднённый» по сечению луч, эти изменения незаметны, в отличие от изменения уровня сигнала РМБ.



а



б

Рис. 1. График зависимости: смещения оптического пучка от радиуса кривизны ОВ (*а*); натяжения ОВ от радиуса изгиба (левая ось); БСЧ от радиуса изгиба ОВ (правая ось) (*б*)

Список литературы

1. Minardo A., Bernini R., Zeni L. // IEEE Photon. Techn. Lett. 2013. V. 25. P. 2362-2364.
2. Roberts A., Thorn K. et. al. // Opt. Lett. 2002. V. 27. No. 2. P. 86-88.
3. Bogachkov I.V. // T-comm. 2019. V. 13. No. 3. P. 75-79.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МАМРАШЕВ[1], Ф.А. МИНАКОВ[1,2], Н.А. НИКОЛАЕВ[1,3], С.А. КУЗНЕЦОВ[2,4], Д.С. ТАНЫГИНА[5]

[1]*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный университет*
[3]*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск*
[4]*Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники - филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*
[5]*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск*

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНЫХ РЕШЁТОК

Исследованы свойства широкополосных терагерцовых поляризаторов на основе одномерных металлических решеток. Решетки изготовлены методом фотолитографии на несущих полимерных пленках различной толщины. Поляризаторы на пленке из полипропилена (PP) толщиной 10 и 3 мкм полиэтилентерефталата (PET) показали наилучшие характеристики: отношение коэффициентов пропускания в режиме максимальной и минимальной прозрачности составило > 10000:1 на частотах < 0,65 ТГц и > 1000:1 на частотах < 2 ТГц.

A.A. MAMRASHEV[1], F.A. MINAKOV[1,2], N.A. NIKOLAEV[1,3], S.A. KUZNETSOV[3,4], D.S. TANYGINA[5]

[1]*Institute of Automation and Electrometry of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*
[2]*Novosibirsk State University*
[3]*Institute of Laser Physics of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*
[4]*Novosibirsk Branch "TDIAM"of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of the RAS*
[5]*Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*

HIGH-PERFORMANCE BROADBAND TERAHERTZ POLARIZERS BASED ON 1D GRIDS

Properties of wideband terahertz polarizers based on one-dimensional metal grids were studied. The grids were manufactured by photolithography on carrying polymeric films with different thicknesses. Polarizers based on 10 μm polypropylene (PP) and 3 μm polyethylene terephthalate (PET) showed the best characteristics: the ratio of maximum and minimum transmission coefficients > 10000:1 for the frequencies < 0.65 THz and > 1000:1 for the frequencies < 2 THz.

Метод широкополосной импульсной терагерцовой (ТГц) спектроскопии хорошо зарекомендовал себя при исследовании оптических и диэлектрических свойств материалов в терагерцовой области спектра [1]. Исследование этим методом дихроичных материалов с высоким контрастом поглощения по разным оптическим осям требует создания высокоэффективных терагерцовых поляризаторов [2].

В данной работе исследованы широкополосные ТГц поляризаторы на основе одномерных алюминиевых решеток, сформированных на несущих полимерных пленках методом фотолитографии [3]. Ширина полос решетки составила 4 мкм, период – 8 мкм, толщина Al напыления менялась от 140 до 300 нм. В качестве пленок использовался полипропилен (PP) толщиной 4, 8, 10 и 20 мкм и полиэтилентерефталат (PET, лавсан) толщиной 3 мкм. На рис. 1 представлены спектральные коэффициенты пропускания по мощности образцов поляризаторов в режиме максимальной и минимальной прозрачности. На рис. 2 приведено их отношение – коэффициент экстинкции. Спектральные особенности около 1,75 ТГц вызваны поглощением паров воды в атмосфере. Наилучшие характеристики показали поляризаторы на пленке PP 10 мкм и PET 3 мкм: коэффициент экстинкции >10000:1 на частотах < 0,65 ТГц и > 1000:1 на частотах < 2 ТГц. Поляризаторы на тонких PP пленках обеспечили лучшее пропускание в режиме прозрачности, однако недостаточная толщина металлического напыления привела к худшему гашению на низких частотах < 0,6 ТГц.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект 19-72-00106.

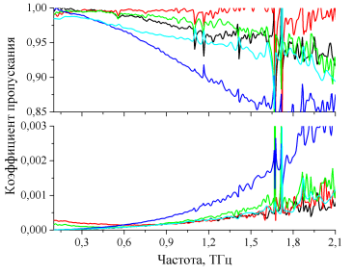


Рис. 1. Спектры пропускания поляризаторов в режимах максимальной (вверху) и минимальной (внизу) прозрачности

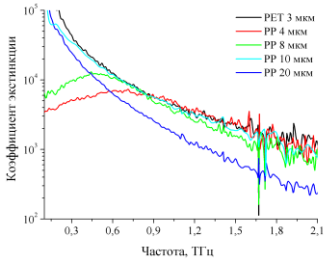


Рис. 2. Коэффициенты экстинкции поляризаторов

Список литературы

1. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. // Laser Photonics Rev. 2011. V. 5. № 1. P. 124-166.
2. Yan F. et. al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2013. V. 34. № 9. P. 489-499.
3. Kuznetsov S.A. et. al. // Key Eng. Mat. 2010. V. 437. P. 276-280.

УДК 535(06)+004(06)

А.Э. АКМАЛОВ, Е.А. АКСЕНОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
Г.Е. КОТКОВСКИЙ, Е.М. МАКСИМОВ, Ю.А. МИТЯГИН[1],
А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ МИКРОКРИСТАЛЛОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Работа посвящена изучению влияния рассеяния терагерцового (ТГц) излучения микрокристаллами 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (RDX) в порошкообразных образцах на их спектры пропускания и отражения. Для экспериментального определения ТГц спектров использовалась установка терагерцового радиовидения со спектральным разрешением. В случае образцов с малыми микрокристаллами 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (характерный размер микрокристалла 100 мкм), в спектрах поглощения несмотря на рассеяние наблюдаются характеристические для кристалла RDX пики 0.8 ТГц и 1.06 ТГц, которые могут быть использованы для идентификации этого вещества. В случае образца, состоящего из крупных микрокристаллов 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (характерный размер микрокристалла 450 мкм), как показали эксперименты и результаты численного моделирования, в спектрах не наблюдается даже самый интенсивный пик в области 0.8 ТГц. Спектры отражения от слоев микрокристаллов с характерным размером 100 мкм качественно отличаются от спектров отражения кристаллов RDX.

A.E. AKMALOV, E.A. AKSENOV, K.I. KOZLOVSKII,
G.E. KOTKOVSKII, E.M. MAKSIMOV, Yu.A. MITYAGIN[1],
A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

STUDY OF TERAHERTZ TRANSMISSION AND REFLECTION SPECTRA OF MICROCRYSTALS OF ORGANIC COMPOUNDS

The work is devoted to the study of the influence of terahertz (THz) radiation scattering by 1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazacyclohexane (RDX) microcrystals in powder samples on their transmission and reflection spectra. An installation of terahertz radiovision with spectral resolution was used to experimentally determine the THz spectra. In the case of samples with small 1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazacyclohexane microcrystals (the characteristic microcrystal size is 100 μm), characteristic peaks of the

RDX crystal at 0.8 THz and 1.06 THz are observed in absorption spectra despite scattering, what can be used to identify this substance. In the case of a sample consisting of large 1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazacyclohexane microcrystals (a characteristic microcrystal size is 450 μm), experiments and numerical simulation showed that even the most intense peak in the region of 0.8 THz is not observed in the spectra. The reflection spectra of the microcrystal layers (a characteristic size of microcrystal is 100 μm) qualitatively differ from the reflection spectra of the RDX crystals.

Наличие особенностей в терагерцовых (ТГц) спектрах пропускания [1] и отражения [2] различных взрывчатых веществ вызывает интерес к созданию систем безопасности, использующих излучение данного диапазона. В качестве примера можно привести системы терагерцового радиовидения со спектральным разрешением [3].

Для приложений терагерцового излучения, связанных с обнаружением веществ в реальных условиях, представляют интерес случаи, когда нельзя пренебречь влиянием рассеяния на качество получаемых спектров (в частности, когда размер частиц исследуемого вещества сопоставим с длиной волны). В данной работе изучается влияние рассеяния ТГц излучения микрокристаллами 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (RDX) в исследуемых образцах на их спектры пропускания и отражения.

Используемая экспериментальная установка позволяет получать терагерцовые изображения объектов с цветовой визуализацией спектральной информации в диапазоне 0.5÷2.5 ТГц.

Для исследований выбран 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексан промышленного производства с двумя различными характерными размерами микрокристаллов: 100 мкм (условное обозначение RDX 1) и 450 мкм (условное обозначение RDX 2).

В случае образцов с малыми микрокристаллами (100 мкм), в спектрах поглощения несмотря на рассеяние наблюдаются характеристические для кристалла RDX пики 0.8 ТГц и 1.06 ТГц, которые могут быть использованы для идентификации этого вещества. В случае образца, состоящего из крупных микрокристаллов (450 мкм), как показали эксперименты и результаты численного моделирования, в спектрах не наблюдается даже самый интенсивный пик в области 0.8 ТГц. Спектры отражения от слоев микрокристаллов с характерным размером 100 мкм качественно отличаются от спектров отражения кристаллов RDX.

Список литературы

1. Chen J., Chen Y. et. al. // Optics express. 2007. V. 15. No 19. P. 12060.
2. Konek C., Wilkinson J. et. al. // Proc. of SPIE. 2009. V. 7311. P. 73110K.
3. Akmalov A.E., Aksenov E.A. et. al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10800. P. 108000G.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. РУСИНОВ, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ НА НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

Методом Z-сканирования исследованы нелинейно-оптические параметры растворов органических красителей, квантовых точек и металлических наночастиц. Показано влияние плазмонных наночастиц на нелинейно-оптические свойства растворов с молекулами красителя.

A.P. RUSINOV, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

INFLUENCE OF PLASMON NANOPARTICLES ON NONLINEAR OPTICAL PARAMETERS OF ORGANIC DYE SOLUTIONS

The study of nonlinear optical parameters of organic dye solutions, quantum dots and metal nanoparticles was carried out by Z-scanning method. The influence of plasmon nanoparticles on nonlinear optical properties of solutions with dye molecules is shown.

Для изучения нелинейно-оптических характеристик растворов разработана установка Z-сканирования [1] с использованием, в качестве накачки, непрерывного полупроводникового лазера мощностью 300 мВт и длиной волны 650 нм. Для сенсибилизации растворов к излучению в данном спектральном диапазоне, и в качестве объекта исследования, использовался органический краситель метиленовый голубой. В зависимости от концентрации водные растворы данного красителя в режиме открытой апертуры демонстрируют несколько различных механизмов нелинейности [2].

При малых концентрациях метиленового голубого, порядка $C = 10^{-5}$ моль/л, сигнал в области фокуса пучка накачки ($z \pm 7$ мм) возрастает, что говорит о некогерентном насыщении поглощения раствора из-за накопления поглощающих молекул в возбужденных состояниях. С увеличением концентрации красителя амплитуда эффекта достигает максимальной относительной величины в 5 % при $C = 1{,}2\times10^{-4}$ моль/л. При б**о**льших концентрациях красителя поведение сигнала изменяется, в диапазоне ($z \pm 20$ мм) его амплитуда уменьшается,

т.е. имеет место усиление поглощения раствора. При концентрации метиленового голубого выше 10^{-3} моль/л нелинейное усиление поглощения раствора становиться преобладающим.

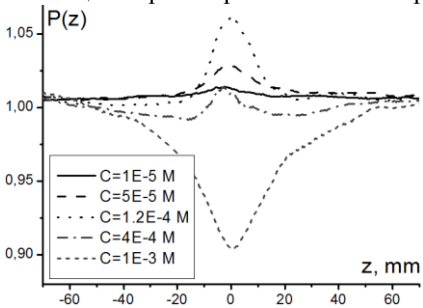


Рис. 1. Сигналы Z-сканирования водных растворов метиленового голубого при различных концентрациях красителя

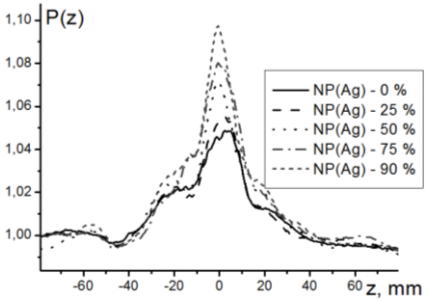


Рис. 2. Сигналы Z-сканирования водных растворов метиленового голубого с концентрацией 5 10^{-5} моль/л в присутствии наночастиц серебра

В качестве плазмонных компонент синтезированы растворы наночастиц серебра и квантовых точек CdSe со средними размерами 30 - 50 нм и концентрациями порядка 10^{14} см$^{-3}$. Плазмонный пик [3] поглощения раствора металлических наночастиц лежит в области 410 нм, полосы поглощения раствора квантовых точек расположены в диапазоне 300 - 450 нм. На длине волны 650 нм поглощение данных растворов мало, однако сигналы Z-сканирования обнаруживают слабый эффект нелинейного усиления поглощения и для наночастиц Ag и для квантовых точек CdSe с амплитудой порядка 1 %.

Введение наночастиц серебра и квантовых точек CdSe в водные растворы метиленового голубого практически не меняет спектральные свойства последних. Однако сигналы Z-сканирования показывают влияние плазмонных наночастиц на нелинейно-оптические параметры растворов (рис. 1 и 2). Так на рис. 2 показано, что при добавлении в раствор наночастиц Ag амплитуда нелинейного насыщения поглощения молекул метиленового голубого в перетяжке пучка накачки монотонно возрастает. При максимальной концентрации наночастиц просветление образца увеличивается примерно в 2.5 раза.

Список литературы

1. Sheik-Bahae M. et. al. // IEEE Journal of Quant. Electron. 1990. V. 26. № 4. P. 760-769.
2. Dissanayake D.M.A.S., Cifuentes M.P. et. al. // Coord. Chem. Rev. 2018. V. 375. P. 489-513.
3. Kucherenko M.G., Kislov D.A. // Journ. of Photochem. and Photobiol. A: Chemistry. 2018. V. 354. P. 25-32.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Д. МИНАЕВА[1,2], Т.С. ДЕМИНА[3,4], А.А. ДУЛЯСОВА[1], Н.В. МИНАЕВ[1]
[1]*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[3]*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова*
[4]*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИКСОВ ИЗ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

В работе приведены результаты экспериментов по формированию матриксов из новых полимерных порошковых методом поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС). Определены оптимальные параметры для спекания используемых материалов. Созданы трёхмерные матриксы с различной внутренней структурой.

E.D. MINAEVA[1,2], T.S. DEMINA[3,4], A.A. DULYASOVA[1], N.V. MINAEV[1]
[1]*Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[3]*Sechenov First Moscow State Medical University*
[4]*Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of the RAS, Moscow*

FEATURES OF THE FORMATION OF SCAFFOLDS WITH NEW POWDER MATERIALS BY SURFACE SELECTIVE LASER SINTERING

The results of experiments of scaffolds formation from new polymer powder materials by the method of surface selective laser sintering (SSLS) are presented. The optimal parameters for sintering the materials used are determined. Three-dimensional scaffolds with various internal structure are created.

Лазерные аддитивные технологии широко используются в различных областях науки и техники. Среди основных сфер применения можно этих отметить тканевую инженерию. Она включает в себя формирование

матричных структур, в которые вводятся органические биоактивные агенты или клеточные культуры.

Используя метод поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС) [1], можно формировать различные трёхмерные матриксы сложной формы из биосовместимых порошков. В методе ПСЛС лазерное спекание полимерных частиц происходит при поглощении лазерного излучения частицами сенсибилизатора, нанесенного на полимерные частицы в небольшом количестве.

Целью работы являлось формирование матриксов из полимерных материалов методом ПСЛС.

В работе использованы биорезорбируемые полимеры, представленные в виде молотого порошка гранулята и сферических частиц, сформированных методом двойной эмульсии, покрытых тонкой гидрофильной оболочкой на основе хитозана.

Получены количественные данные о взаимодействии лазерного излучения с данными порошками как таковыми, и с использованием сенсибилизатора. В качестве сенсибилизатора использовалась вода [2], прогревающая только тонкую поверхностную зону полимерных частиц. Для создания матриксов была использована экспериментальная система ПСЛС [3].

Отработан алгоритм подбора параметров лазерного спекания, подобраны параметры лазерного излучения, позволяющие формировать трёхмерные матриксы из порошковых полимеров. Получены трёхмерные матриксы, готовые для дальнейшего заселения активными веществами и живыми клетками.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственным заданиям ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части разработки новых лазерных аддитивных технологий для задач регенеративной медицины, гранта РФФИ 18-32-20184 в части подбора режимов ПСЛС полимерных порошков и гранта Президента РФ МК-1974.2019.3 в части формования полимерных микрочастиц.

Список литературы

1. Antonov E.N., Bagratashvilli V.N. et. al. // Advanced Materials. 2005. V. 17. P. 327-330.
2. Antonov E.N., Krotova L.I. et. al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45 (11). P. 1023-1028.
3. Минаев Н.В., Антонов Е.Н. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2019. Т. 1. С. 150-152.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. НЕКРАСОВ, М.М. УНТУРА
МИРЭА – Российский технологический университет

ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИХРОМНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Разработан метод синтеза из полиметиновых красителей высокоорганизованных мультихромных металлокомплексных органических нанокристаллов, обладающих максимумами экситонного поглощения в синей, зеленой, красной и ближней инфракрасной области спектра. На основе полученных нанокристаллов красителей разработаны фотоэлементы на гибкой прозрачной ITO/PETF-основе, демонстрирующие четыре максимума фотопроводимости – в синей, зеленой, красной и ближней инфракрасной области спектра, с внешней квантовой эффективностью от 4 до 9 %.

A.D. NEKRASOV, M.M. UNTURA
MIREA – Russian Technological University

ORGANIC PHOTOCELLS BASED ON MULTICHROMIC NANOCRYSTALS OF POLYMETHINE DYES

A method has been developed for the synthesis of highly organized multichromic metal complex organic nanocrystals from polymethine dyes, which have maxima exciton absorption in the blue, green, red, and near infrared spectral region. Based on the obtained nanocrystals of dyes, photocells on a flexible transparent ITO/PETF-wafer are used, showing four maximum of photoconductivity – in the blue, green, red, and near infrared spectral regions, with an external quantum efficiency of 4 to 9 %.

В настоящее время особое внимание исследователей сосредоточено в области разработки органических фотоэлементов на основе высокоупорядоченных нанослоев из органических красителей [1]. В работе [2] было показано, что J-агрегация анионных полиметиновых красителей, содержащих сульфопропильные группы, в водных растворах стимулируется введением многозарядных катионов металлов. В данной работе был разработан метод синтеза в водно-спиртовой среде мультихромных металлокомплексных органических нанокристаллов из полиметиновых красителей, аналогично нашей работе [3], а также исследованы спектральные и фотоэлектрические свойства органических фоточувствительных слоев на их основе. Метод синтеза включает две

стадии. Первая стадия включает управляемую кристаллизацию наноразмерных J-кристаллов кадмиевого Cd^{2+}-комплекса анионного тиамонометинцианина, играющих роль анионных наноплатформ, обладающих максимумом экситонного поглощения в синей области спектра (492 нм). Вторая стадия – «матричный синтез» на поверхности анионных платформ катионных 2D J-агрегатов оксатриметинцианина, тиатриметинцианина и тиапентаметинцианина, с максимумами экситонного поглощения – в зеленой (540 нм), красной (640 нм) и ближней ИК (800 нм) области спектра. На основе полученных мультихромных нанокристаллов красителей созданы образцы фоточувствительных слоев. В качестве катода и анода использовали гибкую прозрачную электропроводящую ITO/полиэтилентерефталат-основу и слой Ag, соответственно. В качестве дырочно-транспортного слоя для снижения уровня темного тока был использован слой иодида меди CuI, полученный взаимодействием с водно-спиртового раствора йода со слоем меди, предварительно нанесенного на ITO электрохимическим способом. Толщина фоточувствительного слоя мультихромных органических кристаллов – 0.2 мкм при оптической плотности в максимумах поглощения около 2; слой красителя наносился методом полива из водной дисперсии. Полученные фотослои показывают четыре пика фотопроводимости – в синей, зеленой, красной и ближней ИК области спектра, с внешней квантовой эффективностью 4.7, 5.4, 6.2 и 9.2 %, соответственно. Разработанный метод синтеза фоточувствительных наноструктур на основе красителей перспективен для применения в области органической электроники и фотоники.

Список литературы

1. Schulz M., Mack M. et. al. // Phys.Chem.Chem.Phys. 2017. V. 19. № 10. P. 6996-7008.

2. Некрасов А.Д., Шапиро Б.И. // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 2. С. 162-168.

3. Shapiro B.I., Nekrasov A.D. et. al. // Optics Express. 2018. V. 26. № 23. P. 30324-30337.

УДК 535(06)+004(06)

К.О. ВОРОПАЕВ, И.О. ЖУМАЕВА, Б.И. СЕЛЕЗНЕВ[1],
А.С. ИОНОВ
АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород
[1]Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ ФОТОДИОДОВ ИК-ДИАПАЗОНА 1310 нм

В данной работе приведены результаты экспериментов по формированию просветляющих покрытий на поверхности активной области ИК- СВЧ pin-фотодиодов. Получены кристаллы с тремя просветляющими покрытиями из различных материалов, нанесенных на поверхность активной области кристаллов. С помощью зондовых методов проведены измерения абсолютной чувствительности фотодиодов на длине волны 1310 нм.

K.O. VOROPAEV, I.O. ZHUMAEVA, B.I. SELEZHEV[1], A.S. IONOV
OKB-Planeta PLC, Veliky Novgorod
[1]Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod

ANTI-REFLECTION LAYERS BASED ON THIN DIELECTRIC FILMS FOR IR- PHOTODIODES 1310 nm

In this paper presents the results of experiments of forming anti-reflections layers on IR- SHF pin-photodiodes surface. The crystals were obtained with three different anti-reflections layers based on thin dielectric films. Absolute sensitivity in spectral region 1310 nm was measured with using probe methods.

Одной из наиболее быстро развивающихся областей является радиофотоника, где требуются высокоскоростные фотодиоды в спектральном диапазоне 1,3 - 1,55 мкм [1]. Просветляющие покрытия предотвращают потери большой части падающего излучения вследствие поверхностного отражения и могут существенно повысить токовую чувствительность фотодиодов [2].

Целью работы является проведение сравнительного анализа различных просветляющих покрытий на основе тонких диэлектрических пленок для увеличения абсолютной чувствительности СВЧ pin-фотодиодов (далее - ФД) в спектральной области 1310 нм. На рис. 1 представлена фотография и сечение кристалла исследуемых ФД.

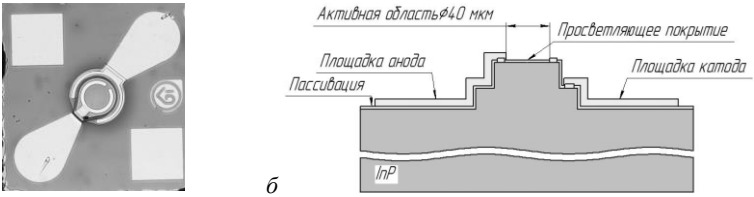
В рамках работы были получены три типа образцов ФД на основе гетероструктуры InGaAs/InP. Образцы кристаллов формировались на одной пластине в едином технологическом цикле, за исключением нанесения просветляющего слоя. Были сформированы просветляющие покрытия на основе тонких пленок из следующих материалов: SiO_2, Al_2O_3 и двухслойное покрытие Si_3N_4/SiO_2.

Измерение абсолютной чувствительности полученных кристаллов выполнялось при помощи зондовых методов. Источником излучения являлся одномодовый лазер с распределенной обратной связью, оснащенный одномодовым оптическим волокном. Мощность генерируемого излучения на длине волны 1310 нм составляла 2 мВт.

Измерения фототока проводились при подаче на ФД обратного смещения величиной -0,5 В. Темновые токи в данном режиме составляли всего 300 пкА, поэтому при расчете абсолютной чувствительности ими можно пренебречь. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные результаты

Просветляющее покрытие	$P_{опт}$, мВт	$I_ф$, мА	$S_{\lambda=1310\ нм}$, А/Вт
SiO_2 (h=223 нм)	2	1.518	0,76
Si_3N_4/SiO_2 (h=164 нм/223 нм)	2	1,616	0,81
Al_2O_3 (h=190 нм)	2	1,601	0,8



а *б*

Рис. 1. Кристалл ФД: фотография кристалла (*а*); схематичное сечение кристалла (*б*)

В результате проведенных исследований установлено, что наилучшими просветляющими свойствами обладает двухслойное покрытие Si_3N_4/SiO_2. К достоинствам всех исследуемых пленок можно отнести возможность их использования, как в качестве просветляющего слоя, так и в качестве пассивирующего покрытия.

Список литературы

1. Urick V.J., McKinney J.D., Williams K.J. // Fundamentals of microwave photonics. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

2. Homier R., Jaouad A., Turala A. et. al.// IEEE J. Photovoltaics. 2012. V. 2. No. 3. P. 393.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БЛАНК, С.Д. БОГДАНОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ФОТОВОЛЬТАТИЧЕСКИХ МАССИВОВ С РАЗЛИЧНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Приведены результаты имитационного моделирования фотовольтаических массивов, создаваемых для задач беспроводной энергетики. Рассмотрены потери фототока при преобразовании пространственно неоднородных энергонесущих пучков, вариация эффективности массива при смещении центра пучка и затенении части рабочей поверхности массива. Созданы имитационные модели распределяющих массивов с трансляционной и ротационной симметрией, представлены результаты сравнительного анализа вносимых коммутационных потерь.

A.V. BLANK, S.D. BOGDANOV
Lomonosov Moscow State Univercity

SIMULATION MODELS OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS WITH VARIOUS SYMMETRY

Presents the results of simulation modeling for photovoltaic arrays created for the tasks of wireless energy transfer. The losses of the photocurrent during the conversion of spatially inhomogeneous energy-harvesting beams, the variation of the array efficiency with a shift in the center of the beam and the shading of part of the working surface of the array are considered. Simulation models of distributing arrays with translational and rotational symmetry are created, the results of a comparative analysis of the introduced switching losses are presented.

Традиционные условия эксплуатации фотопреобразующих систем ориентированы на работу в условиях стационарной и пространственно однородной освещенности активной матрицы ФЭП при постоянном по поверхности значении температуры рабочей панели. В системах беспроводной энергопередачи возникают трудности, связанные с нестационарностью положения системы и пространственной неоднородностью распределения интенсивности по поверхности матрицы элементов. Изменение условий работы накладывает определенные правила к отбору типа фотопреобразующих элементов, методов коммутации в матрицах элементов, сглаживающих исходную неоднородность и нестационарность положения пятна энергонесущего пучка.

Целью имитационного моделирования является определение наиболее эффективного типа коммутации элементов в матрице, а также математический расчёт коммутационных потерь. В основе данной модели лежит численное решение методом Ньютона диодного уравнения, которое описывает процесс фотопреобразования отдельного чипа. Такой метод был реализован в программируемой среде Xcos в работе [1].

Для верификации имитационной модели синтезируем массив на основе кремниевых чипов PERC типа размером 2 x 2 см^2. Создадим сегмент массива, объединив 4 ячейки последовательно и разместив их внутри квадрата. Температурные свойства были ранее исследованы и описаны в работах [2, 3]. Подобное объединений позволяет кратно увеличить напряжение холостого хода, компактная группировка уменьшает вероятность частичной засветки одного сегмента. На втором этапе выполним сборку модуля из четырёх параллельно соединенных сегментов. Размещение сегментов одного модуля на поверхности массива может быть регулярным или квазислучайным. На рис. 1 приведен пример такого размещения – смешанная ротационная параллельно-последовательная (RPS) коммутация. Были проведены тесты по парциальному полосовому затенению по столбцам и строкам матрицы. Определим понятие «дефект тока», как разность токов, вырабатываемых при полной засветке поверхности массива и суперпозиции всех вариантов парциального затенения. Зависимость дефекта тока от относительного диаметра пучка для RPS-коммутации приведена на рис. 2.

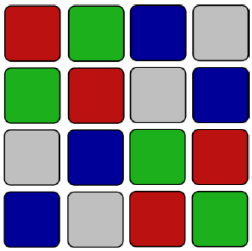


Рис. 1. RPS-коммутация (одним цветом выделяются сегменты модуля)

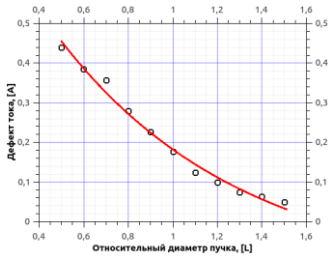


Рис. 2. Зависимость «дефекта тока» от диаметра пучка

Список литературы

1. Ranga S., Kirei B. et. al. // Acta Technica Napocensis. 2017. V. 58 (3). P. 1.
2. Blank A., Razuvaev A. et. al. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 161. P. 1-2.
3. Blank A., Bogdanov S. et. al. // Journal of Radio Electronics. 2019. V. 11. P. 1-27.

УДК 535(06)+004(06)

П.О. ЯКУШЕНКОВ[1,2]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*АО «Дестини электроникс», Москва*

ПРОЕКТ ФОТОННОГО АЦП

Показаны преимущества аналого-цифрового преобразователя на фотонной интегральной схеме по сравнению с АЦП на транзисторной электронике. Рассмотрены некоторые схемы реализации фотонного АЦП, их сравнения, а так же варианты проектирования, моделирования и реализации фотонного АЦП на существующей в России технологической базе.

P.O. YAKUSHENKOV[1,2]
[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*JCK «Destiny Electronics», Moscow*

PHOTONIC ADC PROJECT

Advantages of ADC on photonic integrated circuit, compared with a transistor electronics one is shown. There are some schemes of photonic ADC, their comparing, also some variants of projecting, modeling and realizing it in Russia with given technological base.

Наибольшая частота электронных АЦП, изготавливаемых в России, близка к 500 МГц. Процесс повышения производительности АЦП в настоящее время замедлился, поскольку не удалось снизить флуктуации электронного генератора импульсов, используемого для дискретизации аналогового сигнала, и улучшить быстродействие АЦП. В то же время экспериментально обосновано, что фотонные АЦП (ФАЦП) позволяют на оптической несущей получить значительно более высокую частоту выборки аналогового сигнала, чем это может обеспечить транзисторная электроника [1, 2]. Создание из электрооптических модуляторов фотонного АЦП может обеспечить аналого-цифровое преобразование с частотой порядка 10 ГГц.

Для реализации ФАЦП на фотонной интегральной схеме (ФИС) наиболее оптимальна схема (рис. 1) [3], так как в ней используется одна длина волны, количество компонентов в ней минимально, а модуляторы с различными длинами электродов обеспечивают сразу же необходимые выходные характеристики и не надо для этого делать на чипе еще и электронную схему.

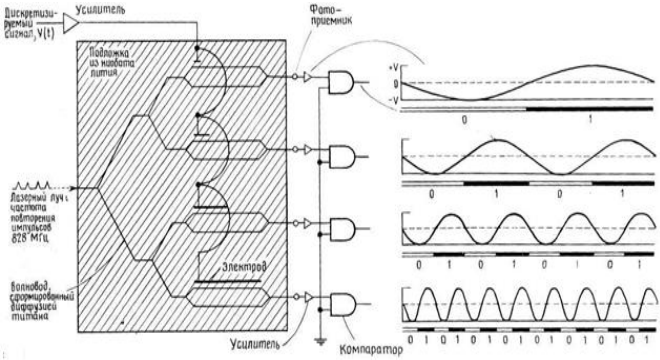


Рис. 1. Схема фотонного АЦП

Основными элементами чипа являются – импульсный лазер, электрооптический модулятор и фотоприемник, изготовленные на единой схеме в интегральном исполнении. Лазеры с частотой импульсов порядка ГГц и быстрые фотоприемники в интегральном исполнении на материалах A_3B_5 для диапазона длин волн в районе 1,55 мкм (популярная в ВОЛС длина волны) изготавливаются на АО НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха. Модулятор типа Маха-Цендера в интегральном исполнении нужно интегрировать вместе с лазером и фотоприемником, который обеспечит частоту переключения от 10 до 100 ГГц. Гетероструктуры из материалов A_3B_5 можно выращивать, не закупая материалы за границей. Для проектирования нами был выбран САПР Lumerical [4]. Эта система совместима с Cadence Virtuoso, на котором проектируется сейчас большинство электронных схем. Для реализации топологии сверхбыстродействующего ФАЦП не обязательно обладать самыми современными в мире технологическими нормами, как Intel (13 нм), электрооптический модулятор типа Маха-Цендера даже размером до нескольких мм может переключаться со скоростями порядка 10 ГГц. Предлагаемый ФАЦП может иметь быстродействие около 10 ГГц. Реализовать топологию ФАЦП на материалах A_3B_5 можно полностью в России. Имея фотонный АЦП, можно будет разрабатывать цифровые фотонные схемы, включая цифровые оптические процессоры.

Список литературы

1. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Радиотехника. 2015.
2. InP-Based Photonic Integrated Circuits. Goldren, 2008.
3. Якушенков П.О., Балаклейский Н.С. Фотонные интегральные схемы // Сб. трудов VI Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 146-148.
4. www.lumerical.com.

УДК 535(06)+004(06)

В.Я. ШУР, А.Р. АХМАТХАНОВ, А.А. ЕСИН, М.А. ЧУВАКОВА, Д.Б. КОЛКЕР[1], А.А. БОЙКО[1], В.С. ПАВЕЛЬЕВ[2]
Уральский федеральный университет, Екатеринбург
[1]Новосибирский государственный университет
[2]Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ С ПРЕЦИЗИОННОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Представлены последние достижения в области создания прецизионных стабильных доменных структур в монокристаллах сегнетоэлектриков: ниобата лития (LN), танталата лития (LT) и титанил-фосфата калия (KTP), для реализации параметрической генерации света (ПГС) и генерации второй гармоники (ГВГ). Также приведены результаты по созданию управляемых дифракционно-оптических элементов (ДОЭ) на основе ниобата лития для управления когерентным излучением.

V.Ya. SHUR, A.R. AKHMATKHANOV, A.A. ESIN, M.A. CHUVAKOVA, D.B. KOLKER[1], A.A. BOYKO[1], V.S. PAVELYEV[2]
Ural Federal University, Ekaterinburg
[1]Novosibirsk State University
[2]Samara National Research University

FERROELECTRIC CRYSTALS WITH PRECISE DOMAIN PATTERNS FOR NONLINEAR OPTICAL CONVERSIONS AND CONTROLLING OF COHERENT LIGHT

We present the recent achievements in periodical poling in single crystals of lithium niobate, lithium tantalate and potassium titanyl phosphate for realization of the optical parametric oscillation and second harmonic generation. We present also the results on creation of lithium niobate based diffraction optical elements for control of coherent light.

Сегнетоэлектрические кристаллы с прецизионными регулярными доменными структурами (РДС) с воспроизводимостью периода до 10 нм использованы для нелинейно-оптических преобразований длины волны лазерного излучения, включающих ГВГ и ПГС, за счет реализации в них условий фазового квазисинхронизма. Создание прецизионных регулярных доменных структур опирается на детальное исследование особенностей

эволюции сегнетоэлектрической доменной структуры. В монокристаллах KTP и LN обнаружено гигантское, более чем на три порядка, различие скоростей доменных стенок при переключении в однородном поле [1, 2]. Выявленные типы стенок («медленные», «быстрые» и «сверхбыстрые») различаются ориентацией.

Полученные закономерности кинетики доменной структуры при переключении поляризации при повышенных температурах позволили оптимизировать методы создания РДС в кристаллах MgO:LN и MgO:LT и реализовать ГВГ преобразование с мощностью более 15 Вт. Созданные веерные доменные структуры в монокристаллах MgO:LN толщиной 1 мм позволили реализовать ПГС с широкой перестройкой холостой волны от 2.5 до 4.5 мкм при накачке лазером 1.053 мкм. Обсуждается возможность изготовления элементов с толщиной до 10 мм для реализации ПГС высокой мощности. В кристаллах KTP создана РДС с периодом 40 мкм для реализации ПГС с холостой волной 2.4 мкм. Рассматриваются возможности и перспективы создания РДС с субмикронным периодом.

Сегнетоэлектрические домены с различным направлением спонтанной поляризации обладают также различным знаком электрооптических коэффициентов, что позволяет создавать перестраиваемые дефлекторы [3], диффузоры [4], зонные пластинки [5] и детекторы Шака-Гартмана [6] управляемые электрическим полем. Установлено, что рабочий диапазон таких ДОЭ ограничен температурой около 200 °C, что связано с уменьшением пороговых полей переключения. Продемонстрирована возможность непрерывного управления дифракционной эффективностью ДОЭ. Показано, что время оклика ДОЭ составляет менее 0.1 мс.

На основе кристаллов LN с определенной доменной структурой изготовлены следующие ДОЭ: (1) гексагональная зонная пластинка с фокусным расстоянием 150 мм и апертурой 1.7 мм и (2) 2D дифракционная решетка с периодом 20 мкм. Зонная пластинка фокусирует до 25 % лазерного излучения в пятно диаметром 130 мкм. Дифракционная решетка позволяет модулировать интенсивность нулевого порядка дифракции на 40 %. Диапазон прозрачности 0.32 - 1.8 мкм ограничен пропусканием управляющего электрода из оксида индия-олова.

Список литературы

1. Shur V.Ya., Vaskina E.M. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 132901.
2. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R. et. al. // Appl. Phys. Lett.. 2019. V. 114. P. 192902.
3. Scrymgeour D.A., Sharan A. et. al. // Appl. Phys. Lett.. 2002. V.81. P. 3140.
4. Cudney R.S., Escamilla H.M. et. al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2004. V.21. P. 1797.
5. Cudney R.S., Ríos L.A. et. al. // Opt. Express. 2004. V. 12. P. 5783.
6. Mávita J., Ríos L.A. et. al. // Appl. Opt.. 2018. V. 57. P. 2208.

УДК 535(06)+004(06)

А.Л. ТОЛСТИК, И.Г. ДАДЕНКОВ, Ю.И. МИКСЮК[1],
К.А. САЕЧНИКОВ[1]
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[1]Белорусский государственный педагогический университет, Минск, Беларусь

МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СЕМЕЙСТВА СИЛЛЕНИТОВ

Рассмотрены схемы мультиплексной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах силиката и титаната висмута. Проведено сравнение динамики наведенного поглощения и релаксации решеток в зависимости от интенсивности импульсного лазерного излучения. Выделены механизмы записи голографических решеток, обусловленные переходом электронов в зону проводимости, заселением коротко- и долгоживущих ловушечных уровней и формированием решетки электрического заряда.

A.L. TOLSTIK, I.G. DADENKOV, Yu.I. MIKSIUK[1],
K.A. SAECHNIKOV[1]
Belarusian State University, Minsk, Belarus
[1]Belarusian State Pedagogical University, Minsk, Belarus

MULTIPLEX RECORDING OF DYNAMIC HOLOGRAMS IN SILLENTES-FAMILY PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS

Schemes of multiplex recording of dynamic holograms in bismuth silicate and titanate photorefractive crystals are considered. The dynamics of induced absorption and gratings relaxation depending on the intensity of pulsed laser radiation is compared. The mechanisms of recording holographic gratings are singled out, which are conditioned by the transition of electrons to the conductivity zone, population of short- and long-lived trap levels and formation of the electric charge grating.

Одним из существенных преимуществ кубических фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов ($Bi_{12}SiO_{20}$, $Bi_{12}TiO_{20}$, $Bi_{12}GeO_{20}$) является формирование в них светоиндуцированных структур при использовании как непрерывного, так и импульсного лазерного излучения [1, 2]. Это открывает возможности оптического управления световыми пучками и позволяют использовать кристаллы силленитов для оптической записи, хранения и обработки информации, усиления оптических изображений и др. Физические процессы записи голограмм определяются

как изменением коэффициента поглощения и показателя преломления при заселении примесных или дефектных центров, так и изменением показателя преломления за счет диффузии электронов и формирования электрического поля. При этом времена жизни ловушечных уровней находятся в весьма широком диапазоне от микросекунд до часов [3, 4].

В работе приведены результаты исследования фотоиндуцированных процессов, приводящих к наведенному поглощению и мультиплексной записи голограмм в кристаллах семейства силленитов со сложной структурой дефектных центров в условиях импульсного воздействия.

Анализ динамики фотоиндуцированного поглощения показал, что времена релаксации ловушечных центров зависят от интенсивности, при этом можно выделить два характерных времени, одно из которых находится в миллисекундном диапазоне, а второе – порядка секунд. Для описания процесса релаксации наведенного поглощения предложена модель коротко- и долгоживущих ловушечных уровней [5]. Сопоставление динамики релаксации динамических решеток и наведенного поглощения позволило определить основные закономерности импульсной записи динамических голограмм. Выделены следующие механизмы записи динамических решеток: а) переход электронов в зону проводимости с последующей релаксацией на короткоживущие ловушечные уровни (времена ~ 100 мкс), б) релаксация ловушечных уровней, сопровождаемая релаксацией наведенного поглощения; и записью амплитудно-фазовых решеток с времена жизни ~ 10 мс, в) формирование фоторефрактивных решеток с временами жизни ~ 1 с. При этом вклад каждого механизма зависит от интенсивности лазерного импульса, а также дефектной структуры кристалла. Так, например, при интенсивностях, меньших либо порядка МВт/см^2, фоторефрактивный отклик среды имеет времена релаксации на уровне секунд. При интенсивностях, превышающих 10 МВт/см^2 определяющую роль играют короткоживущие ловушки с временем жизни порядка 100 мкс для кристаллов силиката висмута и 10 мс для титаната висмута.

Список литературы

1. Murillo J.G. // Optics Communications. 1999. V. 159. P. 293-300.

2. Stankevich A.V., Tolstik A.L., Haider H.K. // Technical Physics Letters. 2011. V. 37. P.746-749.

3. Matusevich A., Tolstik A., Kisteneva M., Shandarov S., Matusevich V., Kiessling A., Kowarschik R. // Applied Physics B. 2008. V. 92. P.219-224.

4. Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A. // Physics Procedia. 2017. V. 86. P. 105-112.

5. Толстик А.Л., Ханон Х.К. // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. 2012. № 2. С. 3-7.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. САЗОНОВ
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

ДИФРАКЦИОННЫЙ ПРЕДЕЛ В ТЕОРИИ СВЕТОВЫХ ПУЛЬ

Развита усредненная вариационная процедура для исследования распространения световых пуль в световодах. Условие, при котором дисперсионная длина значительно больше длины дифракционного расплывания, названо дифракционным пределом. Показано, что в этом пределе временная и пространственная динамики пули не зависят друг от друга, а нахождение динамических параметров солитона сводится к поиску различных решений нестационарного линейного уравнения Шредингера для квантовой частицы. Эффективная потенциальная энергия при этом определяется координатной зависимостью показателя преломления в световоде.

S.V. SAZONOV
National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow

DIFFRACTION LIMIT IN THE THEORY OF LIGHT BULLETS

An averaged variational procedure has been developed for studying the propagation of light bullets in optical fibers. The condition under which the dispersion length is much greater than the diffraction spreading length is called the diffraction limit. It is shown that in this limit the temporal and spatial dynamics of the bullet are independent of each other, and finding the dynamic parameters of the soliton reduces to finding various solutions of the linear Schrödinger equation for a quantum particle. The effective potential energy in this case is determined by the coordinate dependence of the refractive index in the fiber.

Фокусирующая керровская нелинейность вместе с дифракцией и аномальной дисперсии групповой скорости неспособна в однородной объемной среде сформировать устойчивый локализованный во всех направлениях пространственно-временной солитон – световую пулю [1]. В некоторых случаях к устойчивому равновесию может привести линейная рефракция, создаваемая градиентным световодом с неоднородным распределением в его поперечном сечении линейного показателя преломления. Возникает вопрос о том, как аналитически учесть влияние градиентного волновода. Световые пули могут использоваться в системах волоконно-оптической связи. Поэтому аналитические исследования распространения световых пуль в градиентных волноводах весьма желательны и актуальны.

Целью работы является развитие метода усредненного лагранжиана для теоретического анализа распространения световых пуль в градиентных световодах [2, 3].

Предлагается вариационная процедура, восходящая к работам [2 - 4]. Основной смысл состоит в том, что параметры одномерного (временного) солитона считаются неизвестными функциями координат. В результате усреднения соответствующего исходному уравнению лагранжиана по времени находятся уравнения типа течения квантовой бозе-жидкости для солитонных параметров. Данная система с помощью преобразования Маделунга [5] сводится к модифицированному уравнению Гросса – Питаевского.

Если дисперсионная длина значительно превышает длину дифракционного расплывания, в уравнении Гросса – Питаевского можно пренебречь нелинейным слагаемым. Тогда данное уравнение сводится к нестационарному линейному уравнению Шредингера для квантовой частицы, движущейся во внешнем поле с потенциальной энергией. Данная потенциальная энергия в исходной задаче определяется зависимостью показателя преломления от поперечных координат световода. Рассматриваемое приближение названо дифракционным пределом. В этом пределе временная и пространственная динамики световой пули не зависят друг от друга. Временная локализация пули определяется балансом нелинейности и дисперсионного расплывания. Пространственная локализация становится возможной благодаря тому, что дифракционное расплывание компенсируется поперечной неоднородностью показателя преломления – фокусирующей линейной рефракцией. Используя различные профили показателя преломления, можно исследовать разные стационарные и нестационарные режимы распространения световых пуль.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00234а).

Список литературы

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны, М.: Физматлит, 2005.
2. Anderson D., Desaix M., Lisak M., Quiroga-Teixeiro M.L. // JOSA B. 1992. V. 9. P. 1358.
3. Жданов С.К., Трубников Б.А. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92 (5). С. 1612.
4. Sazonov S.V. // Phys. Rev. A. 2019. V. 100. P, 043828.
5. Rogers C., Malomed B. // J. Math. Phys. 2018. V. 59. P. 051506.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. МАЙМИСТОВ, Е.И. ЛЯШКО, С.О. ЕЛЮТИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СПИНОВЫЙ И УГЛОВОЙ МОМЕНТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА

Поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела диэлектрика и среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью (такой как, металл или метаматериал), переносят спиновый и угловой моменты. Оба вектора моментов поверхностной волны лежат в плоскости раздела и перпендикулярны направлению распространения. Для случая, когда одной из сред является топологический изолятор, определена плотность орбитального и спинового углового момента поверхностной волны. Показано, что вектор спинового углового момента имеет проекцию на нормаль к поверхности раздела, что составляет отличие от случая обычных поверхностных поляритонов или плазмон-поляритонов. Дискретная природа тологического числа влечет дискретность компонент спинового углового момента.

A.I. MAIMISTOV, E.I. LYASHKO, S.O. ELYUTIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

SPIN AND ANGULAR MOMENTS OF NONLINEAR WAVES ON THE SURFACE OF A TOPOLOGICAL INSULATOR

Surface waves propagating along the interface of a dielectric and a medium with negative permittivity (such as a metal or metamaterial) transfer spin and angular momentum. Both moment vectors of the surface wave lie in the plane of separation and are perpendicular to the direction of propagation. For the case when one of the media is a topological insulator, the density of the orbital and spin angular momentum of the surface wave is determined. It is shown that the spin angular momentum vector has a projection on the normal to the interface, which is different from the case of ordinary surface polaritons or plasmon-polaritons. The discrete nature of the tological number implies the discreteness of the spin angular momentum components.

Исследование полного углового момента поверхностных волн [1, 2] привело к заключению, что волны, поляризованные перпендикулярно направлению распространения (TE волны), обладают только угловым орбитальным моментом. Для случая TM поверхностной волны, вектор ее магнитного поля лежит в плоскости раздела, распространяющейся вдоль поверхности раздела вакуума и среды с отрицательной диэлектрической

проницаемостью, спиновый момент ненулевой. В [3, 4] было показано, что спиновый и угловой моменты ТМ волны направлены ортогонально волновому вектору поверхностной волны и лежат в плоскости раздела сред. Поперечный полный угловой момент является отличительной характеристикой поверхностных волн – в объемных волнах, в оптических пучках оба угловых момента направлены вдоль распространения волны.

Если поверхностная волна распространяется вдоль границы раздела металла, метаматериала или нелинейного диэлектрика и топологического изолятора (ТИ) [5] , то разделение на ТЕ и ТМ волны не происходит – поверхностная волна имеет все три компоненты [6, 7]. Кроме того, дисперсионное соотношение поверхностной волны многозначно: постоянная распространения зависит от топологического числа, принимающего целые значения. В силу этого, вектор спинового момента имеет две поперечные компоненты, которые образуют дискретное множество: каждой ветви закона дисперсии отвечают свои проекции спинового углового момента на оси, нормальные к направлению распространения [8, 9]. В отличии от мод волновода, дискретность характеристик поверхностной волны (постоянная распространения, поток энергии, полный угловой момент) обусловлена свойствами ТИ, а не интерференцией волн, захваченных волноводом.

Влияние керровской нелинейности диэлектрика, соприкасающегося с ТИ, на образование поверхностной волны учитывалось в [9]. Ненулевая нормальная компонента вектор спинового углового момента и ее дискретность сохраняются. Малые возмущения амплитуды поверхностной волны эволюционируют в кноидальные волны конечной амплитуды, для которых период осцилляций зависит от топологического числа [10].

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00921).

Список литературы

1. Bliokh K.Y., Nori F. // Physics Reports. 2015. V. 592. P. 1-38.
2. Bekshaev A.Y., Bliokh K.Y. // Ukr. J. Phys. Opt. 2018. V. 19. №. 1. P. 33-48.
3. Bliokh K.Y., Nori F. // Phys. Rev. A. 2012. V. 85. P. 061801(R).
4. Bliokh K.Y., Bekshaev A.Y., Nori F. // New J. Phys. 2017. V. 19. P. 063021.
5, Hasan M.Z., Kane C.L. // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. P. 3045.
6. Karch A. // Phys.Rev. B. 2011. V. 83. P. 245432.
7. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Известия РАН сер.физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 27.
8. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. //, Оптика и спектр. 2018. Т. 125. № 6. С. 795-799.
9. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Оптика и спектр. 2019. Т. 126. № 5. С. 578-583.
10. Маймистов А.И., Ляшко Е.И., Елютин С.О.// Изв.РАН сер.физ. 2020. Т. 84. № 1. С. 7-10.

УДК 535(06)+004(06)

И.А. КОЛМЫЧЕК, А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В НАНОСТРУКТУРАХ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации магнитно-индуцированной второй оптической гармоники в наноструктурах с неоднородным распределением намагниченности. Приведено феноменологическое описание источников второй гармоники в магнитных киральных и антиферромагнитных структурах.

I.A. KOLMYCHEK, A.I. MAYDYKOVSKIY, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

OPTICAL SECOND HARMONIC GENERATION IN NANOSTRUCTURES WITH INHOMOGENEOUS MAGNETIZATION DISTRIBUTION

We present the results of the experimental studies of the specific features of magnetization-induced optical second harmonic generation in structures with an inhomogeneous distribution of magnetization. A phenomenological description of second-harmonic sources in magnetic chiral and antiferromagnetic structures is discissed.

Изучение основных свойств границ раздела сред, в особенности между ферромагнитным и немагнитным металлами, представляет значительный интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для множества практических приложений. Современная тенденция к миниатюризации функциональных структур приводит к усилению роли границ раздела в формировании свойств наноструктур, что также приводит к необходимости развития эффективных диагностических методов. В данном контексте перспективным представляется нелинейно-оптический метод генерации второй гармоники, обладающий специфической чувствительностью к свойствам поверхностей и границ раздела центросимметричных сред [1, 2].

В работе рассмотрен ряд экспериментальных результатов по исследованию наноструктур с неоднородным распределением намагниченности, основанный на применении метода генерации второй

оптической гармоники. Рассмотрены такие структуры как (i) многослойные пленки с антиферромагнитным распределением намагниченности [3], (ii) наноструктуры, в которых возможно формирование магнитных вихрей [4], (iii) магнитных наноструктур в форме буквы U (U-shaped nanostructures), а также (iv) слоистые наноструктуры на основе ферромагнитных и тяжелых металлов.

Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории нелинейной оптики наноструктур и фотонных кристаллов Физического факультета МГУ. В качестве источника накачки был использован фемтосекундный лазер на титанате сапфира с требуемой поляризацией, регистрировалось излучение на удвоенной частоте, генерируемое изучаемой структурой. Показано, что для всех рассмотренных видов магнитных наноструктур магнитооптические эффекты на частоте второй гармоники по крайней мере на один порядок по величине превышают соответствующие линейные магнитооптические эффекты. Было показано, что в отличие от линейного магнитооптического отклика, нетривиальные состояния намагниченности наноструктур могут быть визуализированы в нелинейном магнитооптическом отклике, при соответствующем выборе экспериментальной схемы. Так, магнитные вихри и антиферромагнитное состояние наноструктур приводят к появлению магнитного тороидного момента, меняющего симметрию структуры и приводящего к особенностям отклика ВГ. Для U-shaped наноструктур намагниченность вдоль оси симметрии приводит к появлению магнитного циркулярного дихроизма в отклике ВГ. Наконец, для границы раздела ферромагнитного и тяжелого металлов с интерфейсным взаимодействием Дзялошинского-Мория наблюдался интенсивностный эффект на частоте ВГ, запрещенный по симметрии для однородно намагниченных структур.

Таким образом, в серии экспериментальных исследований продемонстрирована высокая чувствительность эффекта генерации второй оптической гармоники к особенностям магнитного упорядочения наноструктур и интерфейсов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 19-72-20103, с использованием оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

Список литературы

1. Kirilyuk A., Rasing Th. // J. Opt. Soc. Am. B. 2005. V. 22. P. 148.
2. Pustogowa U., Hubner W., Bennemann K.N. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 10031.
3. Kolmychek I.A., Krutyanskiy V.L. et. al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. V. 32. P. 331.
4. Krutyanskiy V.L., Kolmychek I.A. et. al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 094424.
5. Kolmychek I.A., Dolgikh I.A. et. al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 045435.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. БУРОВА[1], С.Б. БОДРОВ[1,2], Ю.А. СЕРГЕЕВ[2],
А.И. КОРЫТИН[2], А.Н. СТЕПАНОВ[2]
[1]*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*
[2]*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

ИНДУЦИРОВАННАЯ ТЕРАГЕРЦОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Теоретически и экспериментально исследована генерация второй оптической гармоники при нелинейном взаимодействии оптического и терагерцового импульсов в слое прозрачной изотропной среды. Показано, что для сред, где длина когерентности первой и второй оптических гармоник меньше, чем длина разбегания оптического и терагерцового импульсов, излучение второй оптической гармоники генерируется только тогда, когда оптический и терагерцевый импульсы перекрываются около входной и выходной поверхностях нелинейного слоя. Когда импульсы перекрываются в объеме материала поле второй гармоники локализовано только внутри вещества и не излучается в свободное пространство.

E.A. BUROVA[1], S.B. BODROV[1,2], Yu.A. SERGEEV[2],
A.I. KORYTIN[2], A.N. STEPANOV[2]
[1]*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*
[2]*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

TERAHERTZ PULSE INDUCED SECOND HARMONIC GENERATION OF FEMTOSECOND OPTICAL PULSES IN ISOTROPIC MEDIA

Second optical harmonic generation during nonlinear interaction of optical and terahertz pulses in a layer of a transparent isotropic medium was investigated both theoretically and experimentally. It was shown that for media with a coherent length of the fundamental and second optical harmonics smaller than the walk-off length of the fundamental optical and THz pulses, a SH radiation signal is generated only when the fundamental optical and terahertz pulses overlap near the entrance and exit surfaces of the nonlinear layer rather than when the pulses are superimposed in the bulk.

Теория генерации второй гармоники (ВГ) оптического излучения в изотропных (или периодически поляризованных) материалах с квадратичной нелинейностью хорошо разработана [1, 2]. Эта же теория может быть успешно применена для генерации ВГ в постоянном поле. В

случае генерации ВГ с участием ТГц излучения, когда нелинейный источник ВГ ограничен движущейся областью ТГц импульса, теория еще не разработана.

В данной работе была развита одномерная теория генерации ВГ оптического излучения при нелинейном взаимодействии оптического и ТГц импульсов в слое среды с кубичной нелинейностью. Были рассмотрены различные режимы генерации ВГ в зависимости от соотношения скоростей терагерцового и оптического импульсов на первой и второй гармониках. В частности рассмотрена ситуация, когда длина когерентности первой и второй оптических гармоник меньше, чем длина разбегания оптического и терагерцового импульсов в слое. В этом случае, при определенном времени задержки t_d между оптическим $F(t)$ и ТГц $G(t)$ импульсами, когда их наложение происходит около входной границы среды, внутрь вещества излучается ненулевое поле ВГ (рис. 1а). Амплитуда этого поля определяется величиной ТГц поля на границе в момент падения оптического импульса. При другом t_d, когда оптический и ТГц импульсы накладываются внутри среды (далеко от границ), поле ВГ существует только локально (внутри области ТГц импульса) и не излучается (рис. 1б). При наложении оптического и ТГц импульсов около выходной границы слоя, генерируемая ВГ снова излучается. Таким образом, при изменении t_d сигнал ВГ (пропорциональный энергии) должен повторять интенсивность ТГц импульса. Данный эффект был проверен экспериментально в плавленом кварце толщиной 3 мм (рис. 2). Экспериментальные результаты показали хорошее согласование с теорией.

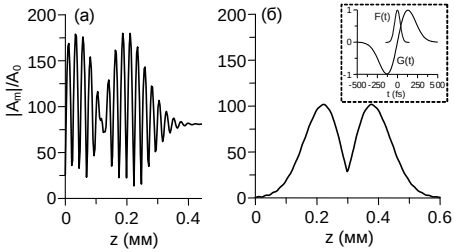


Рис. 1. Динамика генерации ВГ при различных t_d

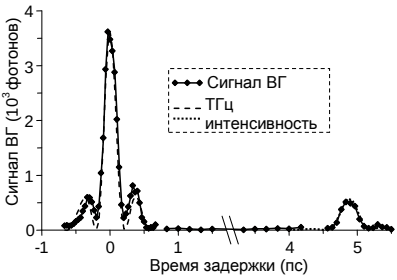


Рис. 2. Измеренный сигнал ВГ в зависимости от t_d

Список литературы

1. Armstrong J.A. et.al. // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 1918-1939.
2. Jerphagnon J., Kurtz S.K. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 1667-1681.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ШЕСТЕРИКОВ, М.Ю. ГУБИН, А.Ю. ЛЕКСИН,
А.В. ПРОХОРОВ, В.С. ВОЛКОВ [1]
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
[1]Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

КОГЕРЕНТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ГИБРИДНЫХ ОПТОПЛАЗМОННЫХ СХЕМАХ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Рассмотрены эффекты квантовой когерентности, возникающие в ансамбле полупроводниковых квантовых точек, расположенных вблизи поверхности графена. Изучены условия формирования и особенности нелинейного управления кинематикой и дисперсионно-абсорбционными свойствами поверхностных плазмон-поляритонов в рассматриваемых системах.

A.V. SHESTERIKOV, M.Yu. GUBIN, A.Yu. LEKSIN,
A.V. PROKHOROV, V.S. VOLKOV[1]
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs
[1]Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny

COHERENT OPTICAL EFFECTS IN HYBRID OPTOPLASMONIC SCHEMES BASED ON GRAPHENE AND SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS

The effects of quantum coherence arising in an ensemble of semiconductor quantum dots located near the surface of graphene are considered. The conditions for formation and features of nonlinear control of the kinematics and dispersion-absorption properties of surface plasmon-polaritons in these systems are studied.

Основой моделирования служат сферические InSb квантовые точки (КТ) с радиусом 20 нм, расположенные на кварцевом буферном слое толщиной 2 нм, нанесенном на лист допированного графена с химическим потенциалом 0.3 эВ и временем рассеяния электронов 0.118 пс. Лист графена расположен на кварцевой подложке, через которую происходит возбуждение КТ лазерным пучком на длине волны 1.52 мкм. Размер КТ и ее расстояние до графена оптимизированы с целью реализации сильной КТ-ППП связи и получения максимальной эффективности возбуждения

ППП в графене на длине волны 5.24 мкм, соответствующей межзонному переходу в КТ (рис. 1).

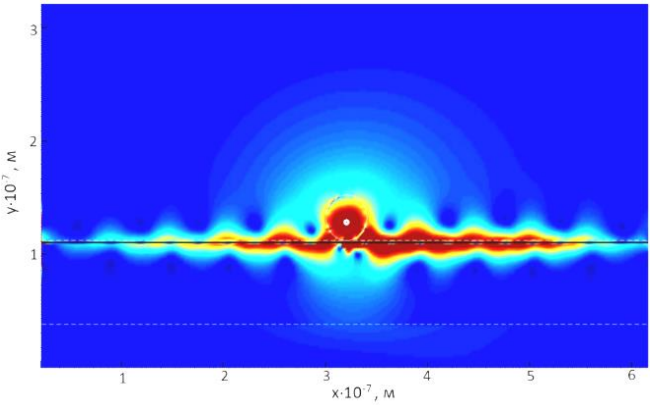


Рис. 1. Пространственное распределение электрической компоненты поля при генерации ППП возбужденной КТ InSb (контур КТ выделен окружностью белого цвета), размещенной на кварцевом слое (расположен между двумя штриховыми белыми линиями) над листом допированного графена (черная линия)

В работе исследованы зависимости сечений рассеяния и поглощения ППП от интенсивности и частоты отстройки поля накачки от резонанса. Определены области значений интенсивности и частотных отстроек накачки, при которых сечение поглощения становится отрицательной величиной при одновременном и резком изменении величины сечения рассеяния. Это соответствует режиму усиления медленных ППП, групповой показатель преломления для которых достигает сотен единиц. Таким образом, в работе продемонстрирована возможность эффективной генерации и усиления медленных (долгоживущих) плазмон-поляритонов, которые могут служить альтернативой длиннопробежным ППП и использоваться для создания ярких ближнеполевых источников поверхностных волн.

А.В. Шестериков благодарит Фонд Содействия Инновациям за поддержку, договор 14287ГУ/2019.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. ДЗЕДОЛИК, В.С. ПЕРЕСКОКОВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ГЕЛИКОИДАЛЬНОЙ НАНОАНТЕННЫ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНАМИ

Представлены результаты моделирования процесса интерференции поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) при отражении от криволинейной границы неоднородности в металлическом слое, а также процесса возбуждения мод геликоидальной наноантенны, расположенной нормально к поверхности металлического слоя. В результате отражения ППП от криволинейной границы неоднородности на поверхности возникают компоненты поля с азимутальной поляризацией, а в сингулярных точках интерференционного поля образуются плазмонные вихри с винтовой дислокацией фазы. Если ось геликоидальной наноантенны расположена в сингулярной точке, то при совпадении знака топологического заряда плазмонного вихря и направления вращения геликоида наноантенны в ней эффективно возбуждаются поверхностные моды.

I.V. DZEDOLIK, V.S. PERESKOKOV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

EXCITATION OF HELICOIDAL NANOANTENNA MODES BY SURFACE PLASMON POLARITONS

The results of simulation of the interference of surface plasmon polaritons (SPPs) upon reflection from the curvilinear boundary of inhomogeneity in the metal layer, as well as of the process of mode excitation of the helicoidal nanoantenna erected normally to the surface of the metal layer are presented. The azimuthal polarization SPP field components are formed because of superposition of the incident and reflected SPPs from the curvilinear boundary of the inhomogeneity on the surface, and then plasmon vortices with a screw phase dislocation appear at the singular points of the SPP interference field. If the axis of helicoidal nanoantenna is located at the singular point and the sign of the topological charge of the plasmon vortex coincides with the sign of direction of the helix rotation, then the surface modes are effective excited in the helicoidal nanoantenna.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), которые возбуждаются на границе раздела металла и диэлектрической среды, распространяются вдоль поверхности металла [1, 2]. При отражении ППП от криволинейной границы неоднородности в металлическом слое изменяется кривизна волнового фронта потока ППП, и в интерференционном поле могут

возникнуть сингулярные точки с винтовой дислокацией фазы – плазмонные вихри [3-6]. Криволинейная граница неоднородности в форме ласточкиного хвоста приводит к формированию плазмонных вихрей на поверхности металла (рис. 1).

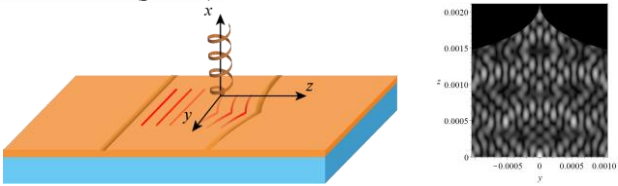


Рис. 1. Золотой слой с неоднородностью на поверхности в форме ласточкина хвоста и наноантенной, расположенный на подложке из плавленого кварца (слева); интерференционная картина нормальных к поверхности компонент электрического поля падающих и отраженных ППП (справа)

Если в области формирования плазмонного вихря с радиусом r_0, на котором имеют место не нулевые значения электрического поля ППП, разместить геликоидальную наноантенну с таким же радиусом, то в наноантенне могут возбудиться поверхностные моды. Для эффективного возбуждения мод геликоидальной наноантенны направление вращения азимутальной компоненты электрического поля ППП вокруг точки, в которой находится ось наноантенны, должно совпадать с направлением вращения геликоида наноантенны.

Форма границы неоднородности на поверхности металлического слоя определяет положение сингулярных точек интерференционного поля ППП и знаки топологических зарядов плазмонных вихрей в них. С помощью геликоидальных наноантенн, расположенных в соответствующих точках поверхности металла, возможно определить картину интерференционного поля ППП. Таким образом, геликоидальные наноантенны можно использовать в качестве нанозондов для считывания сигналов в плазмонных устройствах нанометровых размеров, разрабатываемых на основе изменения топологии интерференционного поля ППП.

Работа поддержана грантом РНФ 19-72-20154.

Список литературы

1. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010.
2. Dzedolik I.V. Solitons and nonlinear waves of phonon-polaritons and plasmon-polaritons. New York: Nova Science Publishers, 2016.
3. Dzedolik I.V., Pereskokov V.S. // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V. 33. No. 5. P. 1004-1009.
4. Dzedolik I.V., Lapayeva S.N., Pereskokov V.S. // J. Opt. 2016. V. 18. No. 7. P. 074007.
5. Dzedolik I.V., Pereskokov V.S. // J. Opt. Soc. Am. A. 2018. V. 35. No. 8. P. 1420-1426.
6. Pereskokov V.S., Dzedolik I.V. // KnE Energy & Physics. 2018. No. 1. P. 190-203.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ, В.А. ДАНИЛОВ[1], В.В. ПОПОВ[1], Б.А. УСИЕВИЧ[2]
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ГУСА-ХЕНКЕН ПРИ ПЛАЗМОННОМ РЕЗОНАНСЕ В СУБВОЛНОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Исследовано влияние ширины падающего пучка света видимого спектрального диапазона на дифракционную эффективность субволновой металлической решетки. Показано, что вблизи плазмонного резонанса возможно наблюдение больших положительных и отрицательных сдвигов Гуса-Хенкен.

N.I. PETROV, V.A. DANILOV[1], V.V. POPOV[1], B.A. USIEVICH[2]
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

ENHANCEMENT OF THE GOOS-HÄNCHEN EFFECT NEAR SURFACE PLASMON RESONANCE IN SUBWAVELENGTH GRATINGS

The influence of the width of the incident light beam of the visible spectral range on the diffraction efficiency of a subwavelength metal grating is investigated theoretically. It is shown that large positive and negative Goos-Hanchen shifts can be observed near the surface plasmon resonance.

Оптические свойства субволновых дифракционных решеток широко изучались в предположении падающих полей в виде плоских волн бесконечной протяженности [1, 2]. Однако, поля источников света пространственно ограничены. Известно, что пучок, отраженный от границы раздела, испытывает пространственные и угловые сдвиги в зависимости от поляризации и профиля пучка [3]. Смещение порядка ширины пучка было показано для многослойных структур в [4]. В [5] исследовано смещение центра тяжести сагиттальных лучей, распространяющихся в градиентном световоде.

В настоящей работе представлено исследование смещения Гуса-Хенкен для пучка видимого диапазона длин волн при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса в субволновой металлической

решетке. Показано смещение порядка ширины пучка для отраженного пучка вблизи поверхностного плазмонного резонанса. При этом отраженный пучок разделяется на два луча, относительные мощности которых зависят от ширины падающего гауссова пучка и глубины решетки. Мы также показываем, что может наблюдаться сильный отрицательный сдвиг пучка, когда глубина решетки больше некоторой критической глубины. На сдвиг Гуса-Хенкен влияет ряд параметров решетки и падающего пучка: глубина и период решетки, материал решетки, угол падения, длина волны и поляризация излучения.

На рис. 1 представлены профили интенсивности отраженных пучков для серебряных решеток с периодом Λ = 400 нм и различной глубиной h. Центр падающего гауссова пучка находится в нуле. Углы падения выбираются из минимума коэффициента отражения для плоской волны. Отражательная способность уменьшается с увеличением ширины пучка, и приближается к нулю для случая плоской волны.

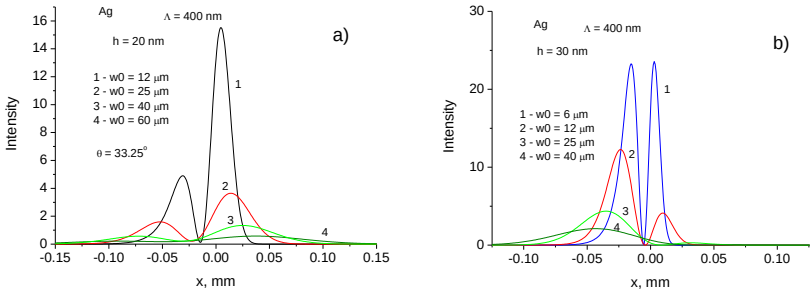


Рис. 1. Профили интенсивности отраженных пучков от серебряных решеток с глубинами h = 20 нм (a) и h = 30 нм (b) для различных значений ширины падающего пучка w_0, λ = 632.8 нм, θ = 33.25 °нм – угол падения

Рассмотренные эффекты могут быть применены при разработке различных датчиков, узкополосных фильтров и оптических выключателей, а также в системах обработки данных.

Список литературы

1. Petrov N.I., Nikitin V.G., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Applied Optics. 2014. V. 53. P. 5740-5744.

2. Петров Н.И., Данилов В.А., Попов В.В., Усиевич Б.А. // Квант. электр. 2018. Т. 48. С. 537–544.

3. Goos F., Hänchen H. // Annalen der Physik. 1947. V. 436. P. 333-346.

4. Tamir T., Bertoni H.L. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 1397-1413.

5. Petrov N.I. // J. Opt. 2013. V. 15. P. 014011.

УДК 535(06)+004(06)

В.Б. НОВИКОВ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИФРАКЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Исследование оптических эффектов в периодических микроструктурах и фотонных кристаллах требует применения численных подходов для предсказания взаимодействия света с этими искусственными структурами. Разработан гибридный метод расчета дифракции света в одномерных и двумерных планарных фотонных кристаллах, сформированных из анизотропных материалов, основанный на сочетании метода конечных разностей в частотной области и метода матриц распространения. Предложенный подход позволяет преодолеть недостатки широко используемых методов конечных разностей во временной области и Фурье-мод.

V.B. NOVIKOV, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

HYBRID FINITE-DIFFERENCE FREQUENCY-DOMAIN METHOD FOR THE MODELING OF THE LIGHT DIFFRACTION IN PLANAR PHOTONIC CRYSTALS

The investigation of the optical effects in the periodical microstructures and photonic crystals requires numerical approaches for the modeling of light interaction with these artificial structures. We developed a hybrid numerical method for light diffraction calculation with one- and two-dimensional planar photonic crystals made of anisotropic materials. The method is based on a combination of the finite-difference frequency-domain method and transfer-matrix method. The proposed approach allows us to overcome the drawbacks of the widely used the finite-difference time-domain method and the rigorous coupled-wave analysis.

Интерес к фотонным кристаллам (ФК) и метаповерхностям связан с тем, что пространственная структуризация веществ на субмикронном масштабе может приводить к весьма разнообразным оптическим эффектам, таким как селективное пропускание, усиление локальных полей, поверхностные состояния и др. Изначально в качестве основы фотонных кристаллов рассматривались диэлектрики, однако недавно был предложен новый тип периодических структур – гиперкристаллы [1]. Основой для них служит искусственный гиперболический метаматериал.

Этот класс метаматериалов проявляет сильнейшую анизотропию оптических свойств – компоненты тензора его диэлектрической проницаемости имеют разные знаки, а изочастотная поверхность представляет собой гиперболоид вместо эллипсоида, характерного для одноосных кристаллов.

Для расчета дифракции излучения на периодических структурах широко используются метод конечных разностей во временной области (FDTD) и метод Фурье-мод (RCWA) [2]. Каждый из этих подходов имеет свои слабые стороны. Так расчет дифракции света на 2D ФК при помощи FDTD требует: а) большого объема памяти для дискретизации трёхмерного объема структуры и окружающего ее пространства, б) расчета временной динамики оптических полей. Кроме того, FDTD напрямую не дает детальной информации о собственных модах поля внутри ФК. В отличие от FDTD метод RCWA работает в частотной области и лишен перечисленных недостатков, однако его приложение затруднительно для сильно анизотропных и металлических структур, в частности, гиперкристаллов.

В работе предложен метод расчета дифракции света в планарных ФК и многослойных дифракционных решетках, изготовленных из анизотропных материалов. Подход применим для описания распространения света через трёхмерные ФК, путем их представления в виде массива слоев. Разработанный гибридный метод основан на сочетании: а) расчета собственных мод излучения методом конечных разностей в частотной области (FDFD) и б) метода матриц распространения, объединяя сильные стороны методов конечных разностей и RCWA. Так, во-первых, вместо дискретизации 3D области требуется лишь небольшой набор 2D сечений диэлектрической проницаемости в элементарной ячейке, во-вторых, метод дает детальную информацию о собственных модах излучения, в-третьих, не требуется выполнение расчета временной динамики электромагнитных полей. Работа метода продемонстрирована на примере дифракции излучения в плазмонных- и гиперкристаллах.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (РНФ), грант № 19-72-00118.

Список литературы

1. Narimanov E.E. // Phys. Rev. X. 2014. V. 4. P. 041014.
2. Moharam M.G. et. al. // JOSA A. 1995. V. 12. P. 1068-1076.

УДК 535(06)+004(06)

У.В. ПРОХОРОВА, Е.А. ЕФРЕМОВА[1], И.Р. КРЫЛОВ
Санкт-Петербургский государственный университет
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПОВОРОТА НА РАССЕЯНИЕ НА ЗОЛОТЫХ НАНОАНТЕННАХ

Мы рассмотрели влияние угла между направлением поляризации и длинной стороной одиночной тонкой золотой наноантенны прямоугольной формы. Показано, что вращение поляризации может приводить к появлению третьего максимума в сечении рассеяния в зависимости от длины волны. Также показано, что амплитудой максимумов можно управлять, меняя направление поляризации падающего света.

U.V. PROKHOROVA, E.A. EFREMOVA[1], I.R. KRYLOV
Saint-Petersburg State University
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

EFFECT OF ROTATION ANGLE ON SCATTERING ON GOLD NANOANTENNAS

It is shown that the rotation of polarization can lead to the appearance of a third maximum in the scattering cross-section depending on the wavelength. It is also shown that the amplitude of the maxima can be controlled by changing the direction of polarization of the incident light. We use full-wave method based on the direct solution of wave equations for the electromagnetic field components in the package Comsol Multiphysics.

В настоящей работе представлен анализ резонансных откликов для золотых наноантенн прямоугольного сечения при взаимодействии с внешним электромагнитным полем, полученных полноволновым моделированием в системе Comsol Multiphysics.

Известно, что субволновые металлические наночастицы имеют резонасный отклик на частотах, зависящих от геометрии и размера такой наночастицы [1, 2]. Такие резонансы обусловлены тем, что наночастицы могут «работать» как микро- и нано-резонаторы [3].

Мы обнаружили, что у тонких наноантенн с определённым форм-фактором имеется двугорбый отклик в области коротких длин волн при падении электромагнитной волны, поляризованной вдоль короткой стороны наноантенны. При повороте наноантенны относительно

поляризации падающей волны в длинноволновой области появляется третий максимум, который растет с увеличением угла поворота и достигает предела при повороте на угол π/2. При этом максимумы в области коротких длин волн уменьшаются практически до нуля.

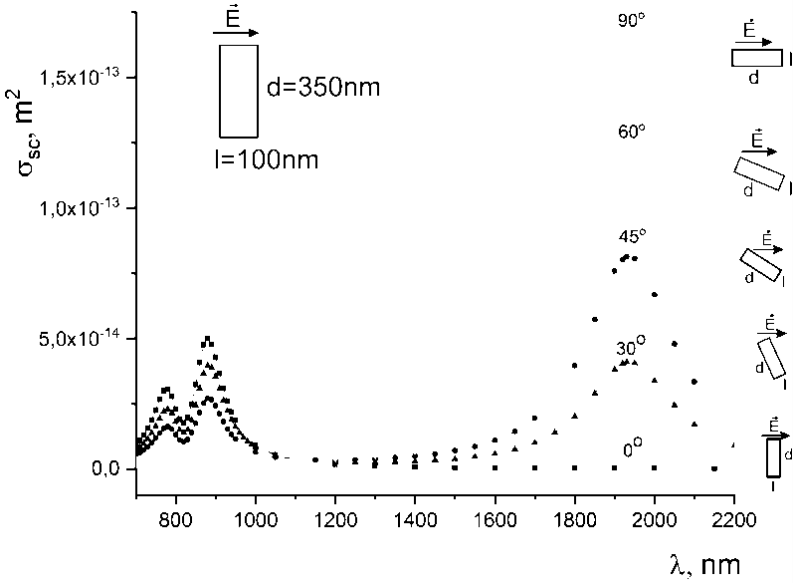


Рис. 1. Зависимость сечения рассеяния от угла поворота наноантенны относительно поляризации падающего поля E, толщина наноантенны h = 5 нм

Сечение рассеянного света при повороте наноантенны на угол π/4 относительно вектора E падающей волны оказывается равным полусумме сечений рассеяния двух других задач, в которых вектор E направлен вдоль l и вдоль d.

Описанный эффект может быть использован при разработке датчиков угла поворота на основе метаматериалов.

Список литературы

1. Bryant G.W., Aizpurua J. et. al. // NanoLetters. 2008. V. 8. No. 2. P. 631-636.
2. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010.
3. Makitalo J., Kauranen M. et. al. // Phys. Rrev. B. 2014. V. 89. P. 165429.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. КАЗАНЦЕВА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВЕКТОРНЫЙ π-ИМПУЛЬС В ОПТИЧЕСКОМ УСИЛИТЕЛЕ С РЕЗОНАНСНЫМИ АТОМАМИ

Численно исследовано усиление и распространение коротких электромагнитных импульсов в виде нелинейных уединённых волн в линейном двулучепреломляющем диспергирующем оптическом волокне, содержащем резонансные атомы с инвертированной населённостью энергетических уровней. Выявлена значительная устойчивость линейно поляризованного векторного светового π-импульса при одновременном влиянии эффектов двулучепреломления и дисперсии оптического волокна. Слабый ультракороткий импульс усиливается при распространении в двулучепреломляющем оптическом волокне, а затем трансформируется в уединённую волну, распространяющуюся без изменения формы, амплитуды и скорости.

E.V. KAZANTSEVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

VECTOR π-PULSE IN OPTICAL AMPLIFIER WITH RESONANT ATOMS

Numerically studied amplification and propagation of ultrashort electromagnetic pulses as nonlinear solitary waves in linear dispersive birefringent optical fiber with resonant atoms with inverted level population. Upper state of atoms is degenerated on the projection of the angular momentum. Numerical simulations show considerable stability of the linearly polarized vector π-pulse in the presence of both birefringence and dispersion of the host fiber. A weak incident pulse of arbitrary polarization is amplified until it is transformed into a stable vector π-pulse without a change of its initial polarization state.

В работе рассмотрено когерентное распространение ультракороткого векторного электромагнитного импульса в кубично нелинейном двулучепреломляющем волокне с внедрёнными в него активными примесными резонансными двухуровневыми атомами. Предполагается, что верхний уровень двухуровневых примесных атомов вырожден по проекции момента импульса, т.е. нижнее состояние атомов является синглетным, а верхнее – триплетным. В уравнениях модели учитывается влияние линейных потерь оптического волокна.

В задаче когерентного усиления импульса в оптическом волокне для векторного ультракороткого оптического импульса, распространяющего в области длин волн, где отсутствует дисперсия групповых скоростей (ДГС), было получено решение, представляющее собой векторный солитон или π-импульс [1, 2]. Это решение в виде уединённой волны, которое существует благодаря балансу между линейными потерями в оптическом волокне и когерентным усилением оптического импульса, проходящего через возбуждённые резонансные атомы примеси, легирующей оптическое волокно. С помощью численного моделирования показана устойчивость линейно поляризованного π-импульса при учете эффектов двулучепреломления и слабой дисперсии групповых скоростей право- и левополяризованных волн. В качестве начальных условий считается, что система резонансных примесных атомов инвертирована, так что при прохождении когерентного импульса она будет действовать в качестве оптического усилителя. При учете эффекта двулучепреломления π-импульсы достаточно устойчивы при распространении и могут возникать из входного пробного импульса такой же формы. При малых значениях ДГС профиль входного импульса, являющегося стационарным импульсом в отсутствие эффекта дисперсии групповых скоростей, почти не меняется, а увеличение влияния этого эффекта приводит к потере устойчивости при распространении уединённой волны, что приводит к частичному разрушению и изменению траектории распространения. В численном моделировании обнаружено, что могут существовать устойчивые векторные π-импульсы с произвольным состоянием эллиптической поляризации. Возможна генерация π-импульса из пробного входного импульса малой амплитуды. Когда амплитуды обеих компонент пробного импульса одинаковы, импульс усиливается в симметрично инвертированной среде, становясь поляризованным векторным солитоном. Если амплитуды входных компонент пробного импульса не равны, то компонента с большей амплитудой усиливается до солитонного решения, а вторая компонента остается ей пропорциональной. Двулучепреломление не препятствует возникновению π-импульса из пробного входного импульса, но право- и левополяризованные компоненты напряжённости электрического поля этой уединённой волны осциллируют с периодом 2π, так же осциллируют и разности населённостей резонансной атомной системы.

Список литературы

1, Kazantseva E.V., Maimistov A.I. et. al. // JOSA. 2007. V. 24. № 3. P. 559-570.
2, Kazantseva E.V., Maimistov A.I. et. al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6612. P. 66120E.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Я. БАЙРАМДУРДЫЕВ, Р.Ф. МАЛИКОВ, И.В. РЫЖОВ[1], В.А. МАЛЫШЕВ[1,2]

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа
[1]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург
[2]Университет Гронингена, Нидерланды

ОПТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА МОНОСЛОЯ КВАНТОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ V ТИПА

Теоретически исследован нелинейный оптический отклик монослоя трёхуровневых квантовых излучателей с дублетом в возбужденном состоянии. Показано, что отклик может быть мультистабильным, и исследована устойчивость различных его ветвей. Неустойчивости имеют характер автоколебаний.

D.Ya. BAYRAMDURDYYEV, R.F. MALIKOV, I.V. RYZHOV[1], V.A. MALYSHEV[1,2]

[1]Akmullah State Pedagogical University of Bashkortostan, Ufa
[1]Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg
[2]University of Groningen, The Netherlands

OPTICAL DYNAMICS OF A MONO-LAYER OF THREE-LEVEL QUANTUM EMITTERS OF V-TYPE

We study theoretically nonlinear optical response of a monolayer of three-level quantum emitters with a doublet in the excited state. It is shown that the response exhibits multistability. The stability of different branches of the response is explored. The only type of instabilities found is self-oscillations.

В настоящей работе теоретически исследуется нелинейный оптический отклик монослоя регулярно расположенных квантовых излучателей (КИ) с дублетом в возбужденном состоянии (V схема). Благодаря высокой плотности КИ и их большой силе осциллятора переходов, диполь-дипольное взаимодействие КИ играет важную роль в оптическом отклике монослоя. Это взаимодействие обеспечивает положительную обратную связь, которая вместе с нелинейностью КИ приводит к таким эффектам, как мультистабильность и автоколебания.

Мы моделируем КИ трёхуровневой квантовой системой, включающей основное состояние $|1\rangle$ и дублет $|2\rangle$ и $|3\rangle$ в возбужденном состоянии с

расщеплением Δ_{32}. Оптически разрешёнными являются переходы $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$и $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$, характеризующиеся константами затухания γ_{21} и γ_{31}.

Оптический отклик монослоя описывается системой нелинейных уравнений для матрицы плотности 3x3 и полного поля Ω, действующего на КИ, в которых учитывается полное запаздывающее диполь-дипольное взаимодействие КИ [1]. Стационарные решения этих уравнений для используемых параметров монослоя [2, 3] оказались многозначными функциями внешнего поля Ω_0 (мультистабильность). Устойчивость решений анализировалась методом показателей Ляпунова [2, 3].

Один из примеров оптического отклика монослоя, рассчитанный для случая, когда отстройка внешнего поля от перехода$|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ равна $\Delta_{31} = 20\gamma_{31}$ и расщепление дублета $\Delta_{32} = 100\gamma_{31}$,представлен на рис. 1. На рис. 1а показано стационарное решение уравнений, $|\Omega|$-vs-$|\Omega_0|$, демонстрирующее его многозначность, на рис. 1б – реальная часть старшего показателя Ляпунова, Max{Re[Λ]}. Пунктиром отмечены неустойчивые части решения и, соответственно, область Max{Re[Λ]} > 0 (критерий неустойчивости). На рис. 1в-д представлены динамика полного поля $|\Omega|$ – (в), спектр Фурье установившегося сигнала (аттрактора) – (г) и фазовая траектория аттрактора – (д). Как видно, при данных параметрах отклик монослоя имеет характер автоколебаний, о чем свидетельствует эквидистантность спектра и замкнутость фазовой траектории аттрактора.

Монослой квантовых точек с вырожденной валентной зоной в магнитном поле [4] может служить реализацией данной модели.

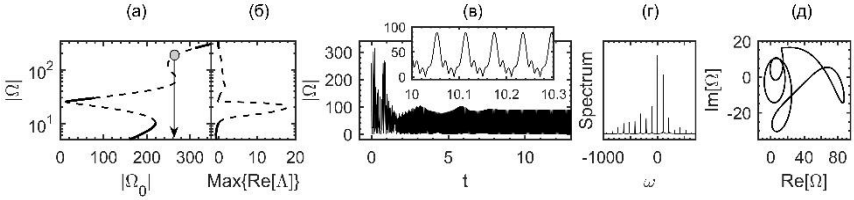


Рис. 1. Стационарное решение$|\Omega|$-vs-$|\Omega_0|$ (а), реальная часть старшего показателя Ляпунова (б), динамика полного поля $|\Omega|$, рассчитанная для $|\Omega_0| = 260$ (в), Фурье-спектр аттрактора (г), фазовая траектория аттрактора (д), все величины размерности частоты даны в единицах γ_{31}, время – в единицахγ_{31}^{-1}

Список литературы

1. Байрамдурдыев Д.Я., Маликов Р.Ф. и др. // В книге: XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO - 2019): сборник тезисов. Москва, 2019. С. 264.

2. Malyshev V.A., Zapatero P.A. et. al. // J.Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1220. P. 012006.

3. Ryzhov I.V., Malikov R.F. et. al. // Phys. Rev.A. 2019. V. 100. P. 033820.

4. Efros A.L., Rosen M. et. al. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 4843.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. АКИМОВ, С.А. ГУЗАИРОВ, В.В. ИВАХНИК
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В СХЕМЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПРИ БОЛЬШИХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ОТРАЖЕНИЯ

При больших коэффициентах отражения исследовано качество преобразования излучения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности в схеме с обратной связью. Построены зависимости коэффициента отражения, полуширины полосы пространственных частот объектной волны от интенсивности волн накачки при условии компенсации фазового набега, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки и при условии сопряжения граней нелинейного слоя.

A.A. AKIMOV, S.A. GUZAIROV, V.I. IVAKHNIK
Samara National Research University

FOUR-WAVE MIXING ON THERMAL NONLINEARITY IN A SCHEME WITH FEEDBACK AT LARGE REFLECTION COEFFICIENTS

The quality of radiation conversion in a four-wave mixing on thermal nonlinearity in a scheme with feedback has been investigated at large reflection coefficients. The dependences of reflection coefficient, half-bandwidth of spatial frequencies of object wave from pumping waves intensity have been constructed under the condition of compensation for the phase shift, arising as a result of the self-action of the pump waves and when the faces of the nonlinear layer are conjugated.

При исследовании процесса четырёхволнового взаимодействия в средах с различным типом нелинейности представляет интерес знание не только амплитудных, но и пространственных характеристик. В качестве пространственной характеристики четырёхволнового преобразователя излучения может выступать полуширина полосы пространственных частот объектной волны, в пределах которой сосредоточена основная доля ее энергии [1].

В работе [2] была показана возможность увеличения коэффициента отражения при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности в схеме с обратной связью. Однако вопрос о качестве преобразования излучения остался открытым. Таким образом, целью

настоящей работы стало исследование влияния обратной связи на пространственную селективность четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности.

В работе рассматривался процесс вырожденного четырёхволнового взаимодействия ($\omega+\omega-\omega=\omega$) в среде с тепловой нелинейностью. Нелинейная среда располагалась внутри кольцевого резонатора, задающего обратную связь по сигнальной и объектной волнам, либо по одной из этих волн.

При совместном решении стационарного волнового уравнения и уравнения Пуассона использовались приближения заданного поля по волнам накачки, параксиальное приближение и условие больших коэффициентов отражения. При больших коэффициентах отражения учитывается не только динамическая решетка показателя преломления, связанная с интерференцией сигнальной волны с первой волной накачки, но и динамическая решетка показателя преломления, возникающая при интерференции объектной волны со второй волной накачки. С учетом сделанных приближений получена система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров сигнальной и объектной волн, пространственных спектров температурных решеток.

Система связанных дифференциальных уравнений с учетом граничных условий анализировалась численными методами на основе многократного прохождения сигнальной и объектной волн нелинейного слоя в кольцевом резонаторе.

При равных интенсивностях волн накачки были построены зависимости амплитудного коэффициента отражения четырёхволнового преобразователя излучения и полуширины полосы пространственных частот объектной волны от интенсивности волн накачки при условии компенсации фазового набега, возникающего вследствие самовоздействия волн накачки и при сопряжении передней и задней граней нелинейного слоя. Определены условия, при которых коэффициент отражения и качество преобразования излучения при наличии кольцевого резонатора выше, чем при его отсутствии.

Список литературы

1. Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. Самарский университет. 2010. С. 246.

2. Акимов А.А., Гузаиров С.А., Ивахник В.В. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 4. С. 534-541.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ИВАХНИК, М.В. САВЕЛЬЕВ
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

ВЛИЯНИЕ МАССЫ НАНОЧАСТИЦ В ПРОЗРАЧНОЙ ЖИДКОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЧЕТЫРЁХВОЛНОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты исследования пространственных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения с учетом силы тяжести, действующей на наночастицы, растворенные в прозрачной жидкости. Показано, что рост массы частиц приводит к повышению эффективности преобразования низких пространственных частот волны, падающей на такой преобразователь.

V.V. IVAKHNIK, M.V. SAVELYEV
Samara National Research University

INFLUENCE OF NANOPARTICLE MASS IN A TRANSPARENT LIQUID ON THE PHASE CONJUGATION ACCURACY BY A FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER

The results of the study of the spatial characteristics of a four-wave radiation converter are presented taking into account gravity acting on nanoparticles dissolved in a transparent liquid. Shown that growth in particle mass leads to an increase in the conversion efficiency of low spatial frequencies of the wave incident on such a converter.

Многокомпонентные среды, такие как коллоидные растворы, микроэмульсии и наносуспензии, являются высокоэффективными нелинейными средами для преобразования низкоинтенсивного лазерного излучения большой длительности [1-3]. При их использовании в четырёхволновых преобразователях излучения, осуществляющих операцию обращения волнового фронта, в системах коррекции фазовых искажений непременно возникает вопрос о точности соответствия сигнальной и объектной волн. В работе [4] показано, что четырёхволновой преобразователь излучения в прозрачной жидкости с растворенными в ней наночастицами осуществляет фильтрацию высоких пространственных частот, вырезая из пространственного спектра объектной волны низкие частоты. При этом пренебрегалось действием на частицы силы тяжести.

Целью работы является анализ пространственных характеристик четырёхволнового преобразователя излучения с учетом силы тяжести, действующей на наночастицы в прозрачной жидкости.

Рассмотрено вырожденное четырёхволновое взаимодействие в схеме со встречным волнами накачки, распространяющимися перпендикулярно горизонтальному слою нелинейной среды. Считалось, что первая волна накачки и сигнальная волна падают на верхнюю грань, а вторая волна накачки – на нижнюю. Использовались уравнения Гельмгольца для прозрачной жидкости с концентрацией наночастиц, не превышающей 10^{12} см$^{-3}$ [3, 5], а также система стационарных материальных уравнений, описывающих изменение температуры и концентрации по слою [4]. В уравнении для изменения концентрации, наряду с диффузионным и электрострикционным потоками, учитывался поток частиц, возникающий в результате действия силы тяжести.

В приближениях заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента отражения с учетом отсутствия полного потока частиц через грани нелинейного слоя и неизменности на них температуры получено аналитическое выражение, описывающее пространственный спектр объектной волны на верхней грани.

В качестве сигнальной волны рассматривалась волна от точечного источника, расположенного на верхней грани нелинейного слоя. Показано, что учет силы тяжести, действующей на наночастицы, приводит к возникновению в модуле пространственного спектра объектной волны максимума вблизи нулевой частоты. Таким образом, четырёхволновой преобразователь излучения осуществляет фильтрацию не только высоких, но и низких пространственных часто с эффективностью, зависящей от массы частиц.

Полуширина полосы пространственных частот, вырезанных четырёхволновым преобразователем излучения, характеризующая точность обращения волнового фронта, с ростом массы частиц возрастает с последующим выходом на зависимость близкую к линейной. При этом коэффициент пропорциональности в ней не меняется с увеличением толщины среды.

Список литературы

1. Moreels I., Hens Z. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 193106.
2. Freysz E. et. al. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. 22 (8). P. 1258.
3. Афанасьев А.А. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 10. С. 891.
4. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 486.
5. Gerakis A. et. al. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9. P. 014031.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Д. МИНАЕВА[1,2], С.А. МИНАЕВА[1], Н.В. МИНАЕВ[1]
[1]*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ЛАЗЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТКАНЕИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ

Представлены результаты экспериментов, направленных на разработку и развитие новых подходов к формированию функциональных эквивалентов костной ткани для задач регенеративной медицины. В работе используется метод двухфотонной фемтосекундной лазерной фотополимеризации биосовместимых и биорезуорбируемых полимерных материалов и лазерной печати живыми клеточными объектами методом прямого лазерного переноса. Такой подход позволяет формировать трёхмерные скаффолды с необходимой внутренней архитектоникой, а также проводить контролируемый процесс включения живых клеток и/или клеточных сфероидов в трёхмерную структуру скаффолда без их повреждения.

E.D. MINAEVA[1,2], S.A. MINAEVA[1], N.V. MINAEV[1]
[1]*Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

LASER ADDITIVE TECHNOLOGY FOR THE FORMATION OF FUNCTIONAL TISSUE-ENGINEERING STRUCTURES FOR BONE TISSUE REPAIR

Presents the result of experiments aimed at the development and development of new approaches to the formation of functional equivalents of bone tissue for the tasks of regenerative medicine are presented. In this work, we use the method of two-photon femtosecond laser photopolymerization of biocompatible polymeric materials and laser printing by living cell objects using direct laser transfer. This approach allows the formation of three-dimensional scaffolds with a certain internal architectonics, as well as a controlled process of incorporating living cells and/or cell spheroids into the three-dimensional structure of the scaffold without damaging them.

Лазерные аддитивные технологии, позволяют реализовать подходы к формированию объемных структур с высоким разрешением по заданным трёхмерным моделям. Они позволяют создавать из жидких, твердых

порошкообразных и гидрогелевых полимерных композиций объемные структуры [1].

Целью работы является разработка подходов к формированию функциональных тканеинженерных конструкций для восстановления структуры и функциональной активности поврежденных участков костной ткани. Сочетание предлагаемых лазерных методов и технологий является перспективным для решения ряда важных задач в области медицины, тканевой инженерии и микробиологии. Для формирования тканеинженерных конструкций в представляемой работе используются лазерные технологии, в первую очередь, двухфотонная фемтосекундная микростереолитография [2]. Отрабатывается методика формирования крупных трёхмерных структур со сложным дизайном, содержащим систему каналов для доставки кислорода, питательных веществ и удаления метаболитов. Для нанесения клеточного материала на формируемые трёхмерные структуры используется технология лазерной биопечати методом прямого лазерноиндуцированного переноса – LIFT (Laser Induced Forward Transfer) [3, 4]. Оба подхода реализуются с помощью оригинальных установок лазерной печати.

В докладе будут представлены разработанные методики и полученные результаты формирования крупных трёхмерных конструкций со сложной архитектоникой и подходы к их функционализации живым клеточным материалом.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-75-00108).

Список литературы

1. Koroleva A., Kufelt O., Schlie-Wolter S., Hinze U., Chichkov B. Laser microstructured biodegradable scaffolds // Biomed Tech. 20132.

2. Demina T.S., Bardakova K.N., Minaev N.V., Svidchenko E.A., Istomin A.V., Goncharuk G.P., Vladimirov L.V., Grachev A.V., Zelenetskii A.N., Timashev P.S., Akopova T.A. Two-photon-induced microstereolithography of chitosan-g-oligolactides as a function of their stereochemical composition // Polymers (Basel). 2017. V. 9. № 7.

3. Yusupov V.I., Zhigarkov V.S., Churbanova E.S., Chutko E.A., Evlashin S.A., Gorlenko M.V., Cheptsov V.S., Minaev N.V, Bagratashvili V.N. Laser-induced transfer of gel microdroplets for cell printing // Quantum Electron. 2017. V. 47. № 12. P. 1158-1165.

4. Antoshin A.A., Churbanov S.N., Minaev N.V., Zhang D., Zhang Y., Shpichka A.I., Timashev P.S. LIFT-bioprinting, is it worth it? // Bioprinting. Elsevier Ltd, 2019. V. 15. P. e00052.

УДК 535(06)+004(06)

В.П. МИНАЕВ, В.Ю. БОГАЧЕВ[1,2], К.А. КАПЕРИЗ[1],
Н.В. МИНАЕВ[3], В.И. ЮСУПОВ[3]
ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино
[1]Первый флебологический центр, Москва
[2]Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва
[3]Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»РАН, Троицк

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВОДЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Приведены результаты исследования теплопереноса в воде при ее нагреве через световоды с торцевым и радиальным выводом излучения с длинами волн 1,55 и 1,94 мкм. Показано, что в зависимости от мощности и длины волны излучения теплоперенос осуществляется за счет конвекции, пузырькового или взрывного кипения. Эффективность процесса для излучения 1,94 мкм выше по сравнению с 1,55 мкм. При этом теплоперенос осуществляется в основном асимметрично, вперед-вверх для торцевого и вверх для радиального световодов.

V.P. MINAEV, V.Yu. BOGACHEV[1,2], K.A. KAPERIZ[1],
N.M. MINAEV[3], V.I. YUSUPOV[3]
IRE-Polus Corporation, Fryazino
[1]The First Phlebological Center, Moscow
[2]Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow
[3]Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

STUDY OF HEAT TRANSFER IN WATER UNDER LASER HEATING

Results of heat transfer in water during its heating with laser light through bare and radial fibers with wavelengths 1.55 and 1.94 μm are presented. It is shown, that depending on power and wavelength heat transfer is carried via convection, bubble or “explosive” boiling. For 1.94 μm process is more effective, than for 1.55 μm. Heat transfer is mainly asymmetric, in direction upward-forward (bare) or upward (radial).

За последние два десятилетия широкое распространение получило использование лазерного нагрева жидкостей при лечении варикозно-расширенных вен методом ЭВЛК [1] и облитерации кист различной локализации [2]. В основе этих методов лежит использование лазерного

нагрева стенок полостей до температуры коагуляции, запускающего процесс фиброзной трансформации, ведущий к облитерации.

Цель работы – с помощью скоростной фотосъемки исследовать процесс теплопереноса в воде от световода с торцевым и радиальным выводом излучения. Примеры съемок приведены на рис. 1 и 2.

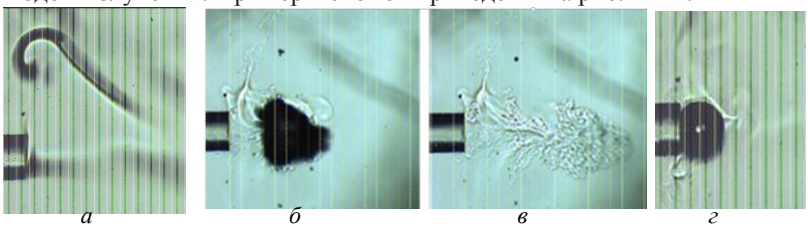


Рис. 1. Гидродинамические процессы вблизи торца волокна диаметром 600 мкм: конвективный перенос (1,55 мкм, 15 Вт) (*а*); последствия акта взрывного кипения (1,94 мкм, 2 Вт) (*б*) и (*в*); пузырьковое кипение (*г*)

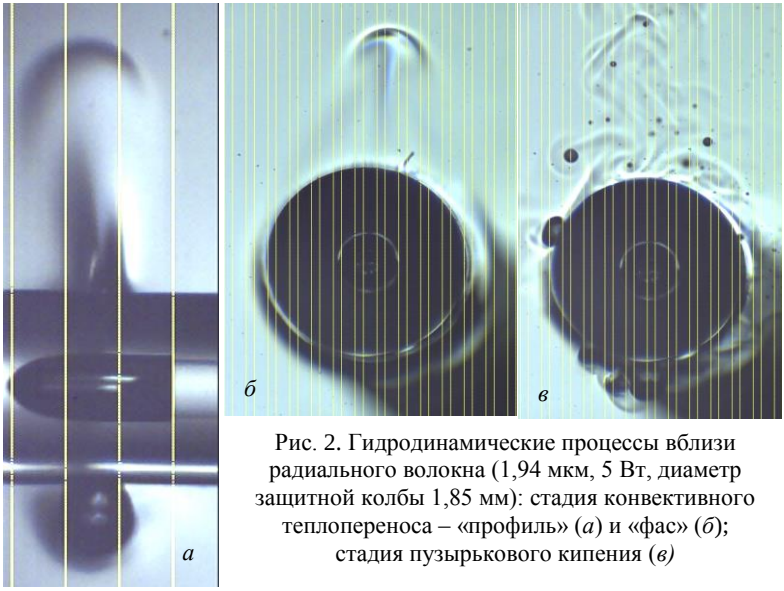


Рис. 2. Гидродинамические процессы вблизи радиального волокна (1,94 мкм, 5 Вт, диаметр защитной колбы 1,85 мм): стадия конвективного теплопереноса – «профиль» (*а*) и «фас» (*б*); стадия пузырькового кипения (*в*)

Список литературы

1. Соколов А.Л., Лядов К.В., Луценко М.М.. Лазерная облитерация вен для практических врачей. М.: ИД «Медпрактика-М», 2011.

2. Крочек И.В. и др.. УЗИ-контролируемая внутриполостная лазерная облитерация кист / под. ред. В.А. Привалова. Челябинск: Издательство «Титул», 2016.

УДК 535(06)+004(06)

Ш.М. ИСМАИЛОВ, В.Г. КАМЕНЕВ, Ю.Д. АРАПОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО И ПРОШЕДШЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлено описание лазерно-оптических методов и аппаратуры для регистрации параметров лазерного излучения, прошедшего и рассеянного дисперсной средой. Результаты применения методов и созданной аппаратуры позволяют получить информацию о концентрации рассеивателей и их размерах при различной интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

Sh.M. ISMAILOV, V.G. KAMENEV, Yu.D. ARAPOV
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

REGISTRATION OF DISPERSION MEDIA PARAMETERS USING AN ANALYSIS OF SCATTERED AND PASSED LASER RADIATION

The report describes laser-optical methods, on the basis of which equipment is developed for recording the parameters of transmitted and scattered dispersed medium laser radiation. The results of the application on the methods and the developed equipment make it possible to obtain information on the concentration of scatterers and their sizes at various intensities of dusting processes in gas-dynamic experiments

В настоящие время изучение процессов образования дисперсной фазы, протекающих при ударно-волновом нагружении является актуальной задачей в области газодинамических исследований. При этом для регистрации движения поверхностей в основном используются оптические и интерферометрические методы [1-3]. Однако, при взаимодействии ударной волны с поверхностью образца и превышении пороговых значений давления наблюдаются процессы откола и микрокумуляции частиц пыли, приводящие к образованию металлических частиц. В начале движения поверхности образовавшиеся частицы обладают скоростями, превышающими скорость самой поверхности, в результате чего поверхность экранируется облаком данных частиц [4]. Образование облака дисперсной фазы существенно влияет на результаты

исследования оптическими и интерферометрическими методами скорости движения именно поверхности, поскольку, во-первых – создаёт паразитный сигнал излучения, отражённого от пыли, и, во-вторых – экранирует поверхность от зондирующего излучения. Взрывные ударноволновые нагрузки могут приводить к деформации конструкции объекта, при этом скорость самого объекта может отличаться от скорости исследуемой поверхности, отколов и продуктов дисперсной фазы.

Поскольку механизмы образования и параметры дисперсной фазы в подобных условиях изучены в недостаточной мере, то это делает востребованными результаты настоящего исследования при создании специальных изделий. Существующие методы имеют ограниченную область применения, поскольку позволяет получить информацию только о некоторых параметрах пылевого облака. Для регистрации распределения частиц по размеру и плотности могут быть использованы методы когерентного обратного рассеяния (КОР) и рассеяние Ми, которые позволяют зондировать облако частиц дисперсной фазы на несколько порядков плотнее, чем другие оптические методы, так как свет в этом случае распространяется в режиме многократного рассеяния [5]. Благодаря этому использование представленных методов и аппаратуры, регистрирующих излучение, рассеянное средой, позволяет получить информацию о параметрах дисперсной среды при высокой интенсивности процессов пыления в газодинамических экспериментах.

Список литературы

1. Кузьмин В.Л., Романов В.П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах // УФН. 1996. Т. 166. № 3. С. 247-278.

2. Sorenson D.S., Pazuchanics P., Johnson R.P. et. al. Ejecta particle size measurements from the break-up of micro-jets in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line Fraunhofer holography // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1793. P. 100026.

3. Kroon D., Lönn S. Utilizing enhanced backscattering for determination of scattering properties in turbid media // Lund Reports in Atomic Physics, PHYM01, 2011.

4. Schauer M.M., Buttler W.T., Frayer D.K. et. al. Ejected particle size distributions from shocked metal surfaces» // J. Dynam. Behavior Mater. 2017. V. 3. № 2. P. 217-224.

5. Monfared S.K., Buttler W.T., Frayer D.K. et. al. Ejecta particle size measurement Mie scattering in high explosive driven shockwave experiments // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. P. 223105.

УДК 535(06)+004(06)

В.Ф. ЛЕБЕДЕВ[1,2], Д.В. БУЛЫГА[1], А.В. КОЛЯДИН[3]
[1]*Университет ИТМО*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
[3]*ООО «Нью Даймонд Технолоджи», Сестрорецк*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА МНОГОСЕКТОРАЛЬНЫХ ПЛАСТИН СИНТЕТИЧЕСКИХ HPHT АЛМАЗОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Сравнительный анализ ЛИЭС-спектров в процессе лазерно-индуцированной модификации поверхности образцов многосекторальных пластин азот- и борсодержащих HPHT алмазов позволил идентифицировать как тип алмаза, так и кристаллографическую ориентацию анализируемого сектора образца.

V.F. LEBEDEV[1,2], D.V. BULYGA[1], A.V. KOLIADIN[3]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
[3]*LLC «New Diamond Technology», Sestroretsk*

ANALYSIS OF IMPURITIES IN MULTISECTORAL PLATES OF SYNTHETIC HPHT DIAMONDS BY LASER-INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY

Comparative analysis of multisectoral diamond plates using LIBS-spectra in conditions of laser-induced modification of surface was performed. It was shown that this approach is effective in terms of determination of type and crystallographic orientation of diamonds.

HPHT метод позволяет выращивать крупные монокристаллические алмазы высокого качества, которые содержат в своей структуре легирующие и примесные центры, влияющие на их оптические и физические свойства. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия (ЛИЭС) – многоэлементный химический анализ материала с чувствительностью на уровне единиц ppm.

Абляция поверхности исследуемых образцов осуществлялась в атмосфере аргона сфокусированным импульсным излучением Nd:YAG лазера на длине волны 1064 нм с плотностью энергии около 1 кДж/см^2. Регистрация спектров плазмы образцов при последовательной,

импульс за импульсом, лазерной модификации поверхности [1] и последующая их обработка производились с помощью скоростного спектрометра AvaSpec-ULS2048L (Avantes) под управлением собственного ПО [2].

Анализ изменения характерных атомарных (H, O, N) и молекулярных (C_2, CN) полос излучения в спектре плазмы в процессе лазерно-индуцированной модификации поверхности оказался эффективным индикатором как секторальной структуры образца, так и вида легирующего элемента (азот, бор [3], рис. 1). Обнаружено, что замена легирующего элемента с азота на бор приводит к замедлению скорости графитизации поверхности (наблюдается меньшая скорость роста интенсивности полосы излучения C_2, характерной для sp^2 гибридизации углерода). Вхождение водорода/кислорода резко увеличивается с увеличением уровня легирования алмаза как азотом, так и бором и существенно зависит от кристаллографической ориентации сектора образца (максимально для ориентации (111)).

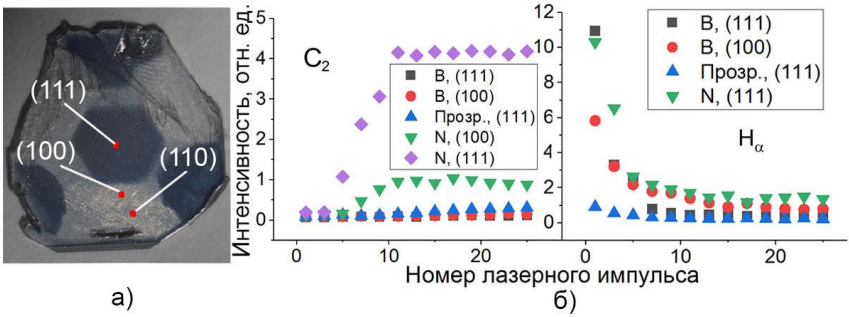


Рис. 1. Многосекторальная пластина легированного бором алмаза (а); Зависимости интенсивностей характерных полос излучения (C_2, H_α) от номера лазерного импульса (б): «B» – алмаз, легированный бором, «N» – алмаз, легированный азотом, «Прозрачный» – алмаз с низкой концентрацией азота

Список литературы

1. Лебедев В.Ф., Павлов К.В., Колядин А.В. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. С. 1171.
2. Lebedev V.F., Kozlyakov M.S., Stepanov D.N. // Spectr. Acta Part B. 2017. V. 137. P. 23.
3. Klepikov I.V., Koliadin A.V., Vasilev E.A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015. V. 286. P. 012035.

УДК 535(06)+004(06)

В.П. ЗАРУБИН[1], В.С. ЖИГАРЬКОВ, В.И. ЮСУПОВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк
[1]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЖИВАЕМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНИЗМОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПЕЧАТИ ГЕЛЕВЫХ МИКРОКАПЕЛЬ

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния физических факторов на живые микроорганизмы при лазерно-индуцированном переносе вещества. Такой подход, позволяющий выделять отдельные группы микроорганизмов, называется лазерной печатью гелевых микрокапель. Как показали результаты биологических исследований, лазерная печать является весьма перспективным методом для биотехнологических и медицинских применений. Результаты данной работы показали, что сопутствующие процессу переноса негативные физические факторы не являются серьезным ограничивающим фактором. Лазерная печать осуществлялась при воздействии на металлическую пленку донорной подложки сфокусированных (30 мкм) наносекундных лазерных импульсов с энергией в диапазоне 5 - 30 мкДж.

V.P. ZARUBIN[1], V.S. ZHIGARKOV, V.I. YUSUPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk
[1]National University of Science and Technology «MISiS», Moscow

COMPLEX STUDY OF SURVIVAL OF BIOLOGICAL ORGANISMS IN LASER PRINTING OF GEL MICRODROPLETS

The report will present the experimental results of the study of the impact of physical factors on living microorganisms during laser-induced transfer of matter. This approach to the separation of certain groups of microorganisms is called laser printing of gel droplets. As shown by the results of biological study, laser printing is a very promising method for biotechnological and medical applications. The results of this work showed that negative physical factors are not a limiting factor. Laser printing was carried out by nanosecond laser pulses with energy in the range of 5 - 30 μJ.

В настоящее время разрабатывается множество биологических и медицинских приложений процесса лазерно-индуцированного переноса вещества [1]. Одно из приложений – выделение, или лазерная печать,

трудно культивируемых микроорганизмов [2]. При осуществлении лазерной печати на донорную стеклянную пластинку с тонким поглощающим металлическим покрытием наносится слой клеточного гелевого субстрата. Воздействие импульсного лазерного излучения приводит к быстрому локальному нагреванию металлической пленки и к возникновению быстро расширяющегося парогазового пузырька, с образованием микроструй жидкости. Однако при протекании указанных процессов возникает целый ряд негативных физических факторов: ударные акустические волны, высокие температуры, большие динамические нагрузки при переносе капель, токсичные наночастицы, образующиеся при разрушении участков поглощающей пленки, а также высокая интенсивность импульсного лазерного излучения, прошедшего через металлическую пленку. В работе получены экспериментальные оценки влияния перечисленных факторов на выживание микроорганизмов в процессах лазерной печати. Схема экспериментальной установки и кадры скоростной съемки показаны на рис. 1. Результаты проведённых биологических экспериментов подтверждают применимость метода.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части разработки технологии для клеточной лазерной печати, грантов РФФИ: № 18-32-00607 и 18-29-06056 в части исследования процесса переноса.

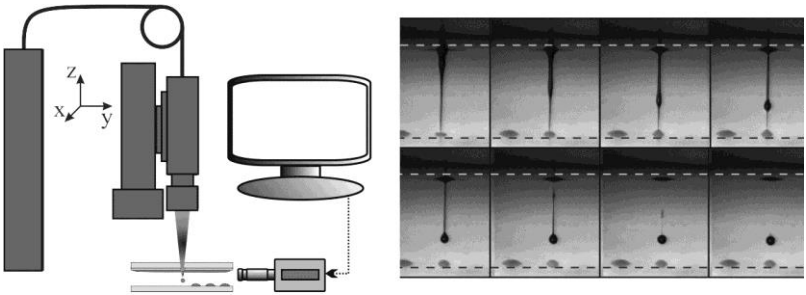


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (слева) и кадры скоростной съемки

Список литературы

1. Zarubin V.P., Zhigarkov V.S., Yusupov V.I., Karabutov A.A. // Quantum Electronics. 2019. V. 49 (11). P. 1068.

2. Yusupov V.I., Gorlenko M.V., Cheptsov V.S., Minaev N.V. et. al. // Laser Physics Letters. 2018. V. 15 (6). P. 065604.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. ХОМИЧ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, С.И. МИКОЛУЦКИЙ, В.Е. РОГАЛИН, В.А. ЯМЩИКОВ, И.А. КАПЛУНОВ[1], А.И. ИВАНОВА[1]

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[1]Тверской государственный университет

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИМПУЛЬСА НА ПОЛИРОВАННУЮ БЕСКИСЛОРОДНУЮ МЕДЬ

Исследована модификация полированной поверхности бескислородной меди после воздействия жёстко сфокусированным одиночным импульсом УФ лазера (длина волны λ = 355 нм, 3-я гармоника импульсно-периодического NdYaG лазера с длительностью импульса τ = 10 нс и энергией до 8 мДж). При предпороговых энергиях (E ~ 0.6 Дж/см^2), в отсутствие заметных следов абляции, наблюдалось необратимое поднятие поверхности металла в зоне облучения. При увеличении E абляционные процессы заметно скрадывают этот эффект.

Yu.V. KHOMICH, T.V. MALINSKIY, S.I. MIKOLUTSKIY, V.E. ROGALIN, V.A. YAMSHCHIKOV, I.A. KAPLUNOV[1], A.I. IVANOVA[1]

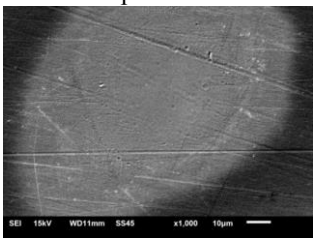
Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Tver State University

HIGH ENERGY UV LASER IMPACT ON POLISHED OXYGEN-FREE COPPER

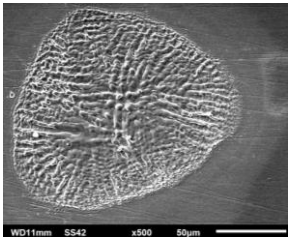
The modification of the polished surface of oxygen-free copper after exposure to a rigidly focused single pulse of a UV laser was investigated. (wavelength λ = 355 nm, 3rd harmonic of a repetitively pulsed NdYaG laser with a pulse duration of 10 ns and energy of up to 8 mJ). It was found that at pre-threshold energies (at E ~ 0.6 J/cm2), in the absence of noticeable traces of ablation, an irreversible rise in the metal surface in the irradiation zone was recorded. With an increase in E, ablation processes noticeably obscure this effect.

Исследовалось поведение полированной поверхности меди после воздействия УФ наносекундными импульсами методом прямого лазерного наноструктурирования. Морфология меди исследовалась на оптическом трёхмерном профилометре – Zygo NewView 7300 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV. На рис. 1*а* приведена РЭМ

микрофотография образца после воздействия пяти импульсов с плотностью энергии E ~ 0.6 Дж/см^2, а на рис. 1*б* – после одного импульса с E ~ 6.2 Дж/см^2. На рис. 2 приведена профилограмма образца, показанного на рис. 1*б*.



а



б

Рис. 1. Поверхность после воздействия: пяти импульсов с плотностью энергии E ~ 0.6 Дж/см^2 (*а*); одного импульса с E ~ 6.2 Дж/см^2 (*б*)

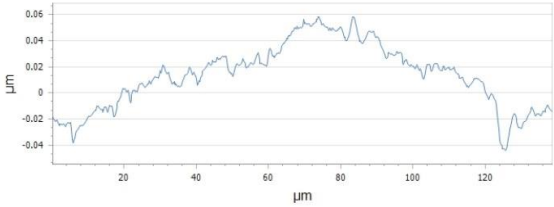


Рис. 2. Профиль поверхности меди в пятне воздействия при E ~ 0.6 Дж/см^2

Анализ характера воздействия лазерного излучения на медь показывает, что при E ~ 0.6 Дж/см^2, в отсутствие заметных следов абляции, зафиксировано необратимое неравномерное поднятие поверхности металла в зоне облучения (рис. 2). При E ≥ 1.0 Дж/см^2, происходил оптический пробой, сопровождавшийся кратерообразованием и абляционными процессами, резко изменяющими структуру поверхностного слоя, и частично компенсирующие поднятие поверхности. Наблюдалось плавление и частичное испарение поверхностного слоя с быстрой последующей кристаллизацией; появились радиальные борозды и холмообразные образования шириной 2-3 мкм и высотой до 2 мкм; зафиксированы микротрещины.

Подъем поверхности объясняется возникновением необратимой термодеформации меди. Его высота, определенная расчетным и экспериментальным путем, может составлять до ~ 150 нм. Если поднятие поверхности произошло за время ~ τ, тогда скорость процесса ~ 1 м/с. Резкий рост шероховатости, видимо, вызван влиянием структурных дефектов.

УДК 535(06)+004(06)

А.Э. АКМАЛОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ, В.А. КОСТАРЕВ,
Г.Е. КОТКОВСКИЙ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИРАЩЕНИЯ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ С ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

В данной работе исследуются особенности применения лазерного излучения для детектирования взрывчатых веществ в паровой фазе. В качестве источника излучения использовался наносекундный YAG:Nd^{3+} лазер с генерацией четвертой гармоники. Методом спектрометрии приращения ионной подвижности были исследованы такие взрывчатые вещества, как циклотриметилентринитрамин (RDX), нитроглицерин (NG), пентаэритрита тетранитрат (PETN), тринитротолуол (TNT). Были определены диапазоны интенсивности и энергии в импульсе лазерного излучения, оптимальные для достижения максимального ионного тока (10^7 - $5\cdot10^7$ Вт/см^2).

A.E. AKMALOV, A.A. CHISTYAKOV, V.A. KOSTAREV,
G.E. KOTKOVSKII
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DETECTION OF EXPLOSIVE VAPORS BY FIELD ASYMMETRIC ION MOBILITY SPECTROMETRY METHOD WITH LASER IONIZATION

The features of application of laser radiation for detection of explosives in vapor phase are studied in this paper. A YAG:Nd^{3+} nanosecond laser with fourth harmonic generation. Cyclotrimethylenetrinitramine (RDX), glyceryl trinitrate (NG), pentaerythritol tetranitrate (PETN), trinitrotoluene (TNT) explosives were investigated with use field asymmetric ion mobility spectrometry (FAIMS) method. The ranges of intensity of laser radiation and pulse energy that are optimal for obtaining maximal ion currents were determined (10^7 - $5\cdot10^7$ W/cm^2).

Было проведено сравнение полученных значений для каждого взрывчатого вещества, обсуждаются причины различий. Для пиков взрывчатых веществ и пиков реактант-ионов с использованием лазерного (λ = 266 нм, τ_{pulse} = 6 нс, E_{pulse} = 700 - 2500 мДж, ν = 10 - 20 Гц) и радиоактивного источников ионизации был получены зависимости их амплитуд и положений по шкале компенсирующего напряжения от

величины разделяющего напряжения при различных интенсивностях лазерного излучения. Было показано различие в поведении пиков взрывчатых веществ при возбуждении лазером и радиоактивным источником ионизации. Это напрямую демонстрирует присутствие дополнительного механизма ионизации вместе с традиционным [1, 2].

Коэффициент использования пробы был определен для ТНТ для спектрометра приращения ионной подвижности с лазерным источником ионизации [3], настроенным на оптимальные параметры излучения [4]. Полученное значение коэффициента использования пробы для лазерного источника ионизации 170 Кл/моль, что сравнимо или несколько превышает значения в литературных данных для радиоактивного источника, коронного разряда, источника поверхностной ионизации.

Было проведено сравнение спектров ионной подвижности, зарегистрированных с помощью спектрометра приращения ионной подвижности для паров химически чистого RDX (используемого для сертификации детекторов для транспортной безопасности в РФ), а также паров фабричного RDX без сертификации высокой химической чистоты. В эксперименте использовался специально сконструированный концентратор паров на основе тонких сеток. RDX высаживался на сетки в процессе откачки паров RDX от указанных источников с помощью вакуумного насоса, после этого сетки промывались в химически чистом ацетонитриле. Смывы исследовались методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией и программируемой термодесорбцией.

Было показано, что присутствие примесей в используемом RDX фабричного производства не приводит к нарушению закона Рауля и искажению спектра ионной подвижности по сравнению со спектром для химически чистого RDX. Таким образом в паровой фазе, спектрометр приращения ионной подвижности регистрирует именно пары RDX, а не пары примесей в RDX, как считалось ранее.

Список литературы

1. Kotkovskii G., Tugaenko A., Chistyakov A. Negative ion formation in laser ion mobility increment spectrometer // Technical Physics Letters. 2010. V. 36(3). P. 276-278.

2. Martynov I., Karavanskii V., Kotkovskii G., Kuzishchin Yu., Tsybin A., Chistyakov A. Ion mobility spectrometer with ion source based on laserirradiated porous silicon // Technical Physics Letters. 2011. V. 37(1). P. 15-18.

3. Akmalov A.E., Bogdanov A.S., Chistyakov A.A., Kotkovskii G.E., Spitsyn E.M., Sychev A.V., Perederii A.N. A laser desorption ion-mobility increment spectrometer for detection of ultralow concentrations of nitro compounds // Instruments and Experimental Techniques. 2013. V. 56 (3). P. 309-316.

4. Akmalov A.E., Chistyakov A.A., Kotkovskii G.E., Kostarev V.A. Parameters of laser ionization of explosives for ion mobility spectrometry // Proc. SPIE. 2018. P. 10802.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. МАШКО[1,2], А.А. МЕЙСТЕРСОН[1,2], А.Е. АФАНАСЬЕВ[1], В.И. БАЛЫКИН[1]
[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

ИМПУЛЬСНАЯ ДИПОЛЬНАЯ ЛОВУШКА ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В работе приведены результаты исследования свойств дипольной ловушки фемтосекундной длительности. Выявлены основные механизмы потерь атомов из импульсной дипольной ловушки. Представлены результаты сравнения времени жизни атомов в ловушке, образованной импульсным излучением различной длительности импульса, и в ловушке, образованной непрерывным лазерным излучением.

A.M. MASHKO[1,2], A.A. MEYSTERSON[1,2], A.E. AFANASIEV[1], V.I. BALYKIN[1]
[1]*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

PULSE DIPOLE TRAP OF FEMTOSECOND DURATION

The work presents the results of a study of the properties of a dipole trap of femtosecond duration. The main mechanisms of atom loss from a pulsed dipole trap are revealed. The results of comparing the lifetime of atoms in a trap formed by pulsed radiation of various pulse durations and in a trap formed by continuous laser radiation are presented.

Лазерное охлаждение и локализация нейтральных атомов и ионов определяют основные достижения в квантовой информатике, квантовой химии и квантовых сенсорах. Применение развитых подходов ограничено наличием непрерывных лазерных источников для атомов и молекул, имеющих удобную внутреннюю структуру энергетических уровней. Отсутствие таких удобных (по частоте и интенсивности) узкополосных лазерных источников в ультрафиолетовом диапазоне спектра ограничивает применение методов лазерного охлаждения и локализации вне щелочных металлов. Например, для наиболее распространенных атомов в органической химии (водород, углерод, кислород и азот),

которые имеют резонансные переходы в синей и ультрафиолетовой части спектра.

При переходе к лазерному охлаждению и локализации атомов в ультрафиолетовом диапазоне спектра, наиболее перспективным является использование фемтосекундного лазерного излучения. Это связано с увеличением эффективности нелинейного преобразования частоты существующих источников импульсного излучения в интересуемый спектральный диапазон. Использование импульсного лазерного излучения позволит не только расширить список атомов, которые могут быть охлаждены и локализованы, но и открывает новые возможность для работы с атомами методика охлаждения и локализации которых уже развита.

Долгое время данный подход лежал исключительно в области теоретических исследований. Экспериментальная локализация атомов в импульсном поле была ограничена длительностью 1 пс [1]. Наиболее распространенным мнением, объясняющим отсутствие локализации при использовании фемтосекундного излучения, являлась большая спектральная ширина фемтосекундного импульса, приводящая к интенсивным процессам фотоассоциации атомов.

Недавно нами было продемонстрировано [2], что основным процессом, ограничивающим локализацию атомов в импульсном поле фемтосекундной длительности, является процесс импульсной диффузии, связанный с флуктуацией дипольной силы, действующей на атом. Потери, вызванные процессом импульсной диффузии, зависят от пиковой интенсивности, поэтому, при переходе к излучению с меньшей длительностью импульса без изменения средней интенсивности локализующего поля, потери, связанные с процессом импульсной диффузии, начинают увеличиваться и доминировать для случая фемтосекундного излучения .

В настоящей работе будут представлены результаты исследования времени жизни атомов при различных длительностях импульсного поля. Это позволило произвести экспериментальную оценку скоростей фотоассоциации атомов и их нагрева при локализации в импульсном поле. Кроме того, будет рассмотрено применение фильтра, селективного по частоте излучения, для контроля спектра локализующего излучения.

Список литературы

1. Clarke R.B.M. et. al. // Appl. Phys. B. 2000, V. 70. P. 695.

2. Afanasiev A.E. et. al. // Proceedings of 8th International Symposium “Modern Problems of Laser Physics” (MPLP-2018). 2018, P. 27.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, Ж.-Ф. ЛАМПИН[1],
Ю.А. МИТЯГИН, С.А. САВИНОВ, А.М. САГИТОВА,
Д.В. СИНИЦЫН, И.А. ЧЕБОТАРЕВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[1]*Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, Лиль, Франция*

ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ NH_3 ЛАЗЕРА ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ «ДЛИННЫМИ» ИМПУЛЬСАМИ CO_2 ЛАЗЕРА

Измерена форма импульса генерация в терагерцовом диапазоне на молекулах аммиака при оптической накачке излучением импульсного электроионизационного CO_2 лазера на переходах 9R(30) и 9R(16).

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV,
A.A. KOTKOV, A.Yu. KOZLOV, J.-F. LAMPIN[1], Yu.A. MITYAGIN,
S.A. SAVINOV, A.M. SAGITOVA, D.V. SINITSYN,
I.A. CHEBOTAREV
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[1]*Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology, Lille, France*

TIME BEHAVIOR OF NH_3 LASER TERAHERTZ EMISSION UNDER OPTICAL PUMPING BY “LONG” PULSE CO_2 LASER

A waveform of pulsed terahertz lasing of ammonia molecules was measured under optical pumping by “long” pulse e-beam sustained discharge CO_2 laser on 9R (30) and 9R (16) transitions.

Впервые измерены с наносекундным разрешением формы импульсов излучения NH_3 лазера и импульсного электроионизационного селективного CO_2 лазера, использованного для его накачки. До настоящего времени формы импульсов NH_3 лазера исследовались либо при короткой длительности накачки (~ 10 нс) [1], либо при временном разрешении не лучше ~ 20 нс и длительности ~ 3 мкс [2].

Импульсы нашего CO_2 лазера имели длительность ~100 мкс с энергией до ~ 1 Дж на переходах 9R(30) или 9R(16), на которых есть сильное поглощение молекулами NH_3. Оптическая схема эксперимента была аналогична использованной в работе [3]. Излучение CO_2 лазера

заводилось в кювету длиной 20 см, ограниченную с одной стороны окном из BaF_2, а с другой – окном из тефлона толщиной 1 мм. Внутри ячейки были расположены два плоских латунных зеркала на расстоянии 12 см с отверстиями на оси кюветы диаметром 2 мм, через которые осуществлялся ввод излучения накачки (со стороны окна из BaF_2) при фокусировке линзой с f = 90 мм и вывод терагерцового излучения (с другой стороны). Излучение CO_2 лазера отсекалось кристаллическим кварцем. В ячейку напускался аммиак при давлении от 2 до 10 мбар.

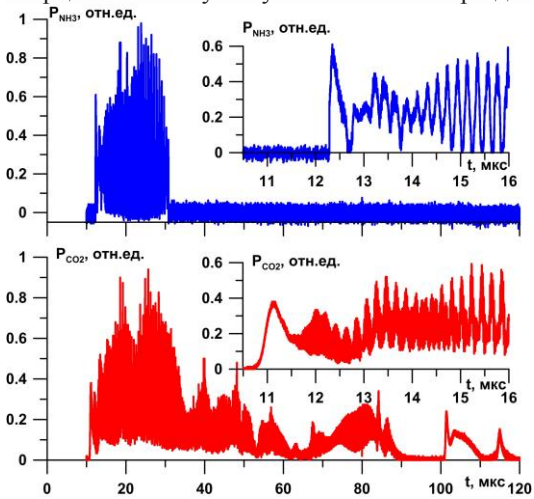


Рис. 1. Форма импульсов излучения CO_2 лазера (нижний) и NH_3 лазера (верхний)

Излучение NH_3 лазера измерялось болометром RS 0.4-4 T (ЗАО “Сконтел”, разрешение ~ 1 нс), охлаждаемым жидким гелием. Типичная форма импульса накачки (CO_2 лазера), а также NH_3 лазера (терагерцового излучения) представлены на рис. 1. Максимальное значение терагерцового излучения наблюдалось при давлении аммиака в ячейке 8 мбар при накачке излучением на линии 9R(16).

При накачке излучением на линии 9R(30) максимальный сигнал терагерцового излучения наблюдался при давлении аммиака 2 мбар. Задержка начала генерации NH_3 лазера относительно начала импульса накачки составляла ~ 2 мкс, а длительность генерации лежала в диапазоне от 10 до 20 мкс в зависимости от энергии импульса CO_2 лазера.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-52-16019).

Список литературы

1. Hirose H., Kon S. // IEEE J. of Quant. Elect. 1986. V. 22. P. 1600.
2. Wilson T.E. // International J. of Infrared and Millimeter waves. 1993. V. 14. P. 303.
3. Nishi Y., Horiuchi Y., Wada S. et. al. // Japanese J. of Applied Physics. 1982. V. 21. P. 719.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. КОПЬЕВА, С.А. ФИЛАТОВА[1], В.А. КАМЫНИН[1],
Т.К. ЧЕХЛОВА, В.Б. ЦВЕТКОВ[1,2]
Российский университет дружбы народов, Москва
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИМПУЛЬСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАХА–ЦАНДЕРА

Реализована схема полностью волоконного гольмиевого лазера с активной модуляцией добротности и генерацией на длине волны 2100 нм. Показано влияние изменения коэффициента отражения выходного зеркала резонатора (4, 10, 20 %) на длительность импульса. Получена минимальная длительность импульса 0,64 мкс в схеме с коэффициентом отражения выходной брэгговской решетки 20 %.

M.S. KOPYEVA, S.A. FILATOVA[1], V.A. KAMYNIN[1],
T.K. CHEKHLOVA, V.B. TSVETKOV[1,2]
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

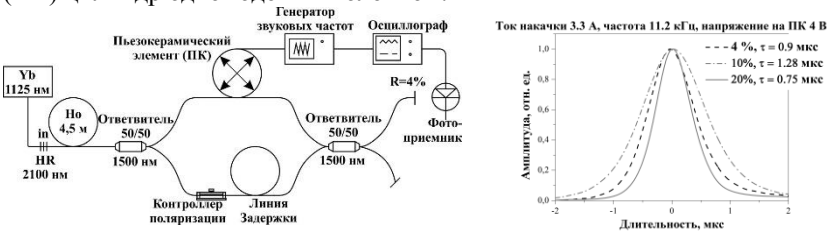
PULSE HOLMIUM–DOPED FIBER LASER WITH INTRACAVITY MACH–ZEHNDER INTERFEROMETER

A scheme of a fully fiber holmium (Ho) laser with active Q-switching and lasing at wavelength of 2100 nm was realized. The effect of changing the reflection coefficient of the output mirror of the resonator (4, 10, 20 %) on the laser pulse duration is shown. A minimum pulse duration of 0.64 μs was obtained in a scheme with an output Bragg grating having a reflection coefficient of 20 %.

Интерес к источникам излучения двухмикронного спектрального диапазона обусловлен широкой областью их возможных применений, таких как медицина, лазерная локация, обработка материалов, детектирование газов и т.д. Поэтому разработка компактных источников с управляемыми режимами генерации является актуальной задачей.

На рис. 1*а* представлена схема гольмиевого волоконного лазера с внутрирезонаторным интерферометром Маха–Цандера. Для накачки гольмиевого лазера был использован иттербиевый волоконный лазер, работающий в непрерывном режиме на длине волны 1125 нм. В качестве

высокоотражающего зеркала резонатора гольмиевого лазера была использована волоконная брэгговская решетка (ВБР) с коэффициентом отражения 99 % на длине волны 2100 нм. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора гольмиевого лазера изменялся от 4 до 20 % за счет использования коннектора FC/PC с перпендикулярно полированным торцом, который обеспечивал коэффициент отражения 4 %, а также за счет использования ВБР с разными коэффициентами отражения 10 и 20 %. Волоконный модулятор на основе интерферометра Маха–Цандера, внедренный в резонатор лазера, состоял из двух волоконных ответвителей с коэффициентом деления 50/50, работающих на длине волны 1550 нм и двух плеч. В активном плече находился фазовый модулятор, образованный намотанным на пьезокерамический (ПК) цилиндр одномодовым волокном.



а *б*

Рис. 1. Схема лазерной установки (*а*), сравнение длительности импульсов при схожих значениях тока накачки, модулирующей частоты и напряжения (*б*)

Наблюдалось изменение временных характеристик излучения в зависимости от параметров модуляции (амплитуды и частоты), мощности накачки и разных коэффициентов отражения выходного зеркала резонатора гольмиевого лазера (4, 10, 20 %). Для всех исследуемых схем с разными коэффициентами отражения наблюдалось уменьшение длительности импульсов с 2,56 до 0,64 мкс при увеличении амплитуды напряжения на ПК от 2 до 10 В. Увеличение мощности накачки от 3 до 4 Вт также приводило к уменьшению длительности импульсов во всех исследуемых схемах. Кроме того, с увеличением коэффициента отражения выходного зеркала резонатора гольмиевого лазера длительность импульсов, также, уменьшалась с 0,9 до 0,75 мкс (рис. 1*б*).

Минимальное значение длительности импульса 0,64 мкс было достигнуто в схеме с коэффициентом отражения ВБР, равным 20 %, при мощности накачки 4 Вт и амплитуде напряжения на ПК цилиндре 2,61 В.

Список литературы

1. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. С. 130.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ШУЛЬГА, А.В. ХОМЧЕНКО, И.В. ШИЛОВА
Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ ПРИЗМОЙ СВЯЗИ ВО ВНЕШНЕМ РЕЗОНАТОРЕ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Описан метод возбуждения мод шепчущей галереи в цилиндрическом микрорезонаторе призмой связи двукратного полного внутреннего отражения внутрирезонаторным излучением полупроводникового лазерного диода с внешним частотно-селективным резонатором. Представлена оптическая схема установки для реализации описанного подхода.

A.V. SHULGA, A.V. KHOMCHENKO, I.V. SHILOVA
Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

EXCITATION OF WHISPERING GALLERY MODES BY COUPLING PRISM PLACED IN LASER DIODE EXTERNAL CAVITY

A technique of whispering gallery mode excitation in a cylindrical microresonator by a prism of double total internal reflection with intracavtiy radiation of a laser diode with frequency selective external resonator is described. The optical layout of the experimental setup for realization of the approach is presented.

Оптические микрорезонаторы, поддерживающие моды шепчущей галереи, представляют практический интерес для создания высокочувствительных датчиков концентрации примесей в газовых и жидких средах [1]. Возбуждение таких мод в цилиндрических микрорезонаторах призменным устройством связи [2] осуществляется за счёт нарушенного полного внутреннего отражения, при котором часть энергии излучения, претерпевающего полное внутреннее отражение от основания призмы связи, туннелирует в цилиндрический микрорезонатор, приведенный в оптический контакт с основанием призмы. Интенсивность возбуждаемой при этом моды зависит от оптического поглощения окружающей среды.

Принципиальная схема установки для исследования характеристик мод шепчущей галереи, приведена на рис. 1, где при возбуждении таких мод перекачка энергии в микрорезонатор (оболочку оптического волокна) осуществляется при помощи призмы двукратного полного внутреннего отражения [3], обеспечивающей изменение угла падения излучения на

основание призмы без нарушения юстировки внешнего резонатора. Длина волны излучения изменялась поворотом дифракционной решётки, выполняющей роль отражающего элемента внешнего резонатора лазера.

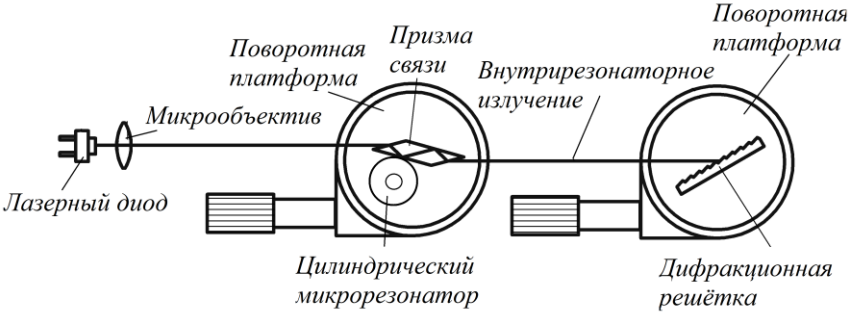


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Коллимированное излучение полупроводникового лазерного диода ($\lambda \sim 785$ нм) после преломления на входной грани призмы связи двукратного полного внутреннего отражения отражалось от ее основания в области оптического контакта с волокном. После второго полного внутреннего отражения излучение преломлялось на боковой грани призмы и выходило из нее, сохраняя первоначальное направление распространения. Поворотная платформа, на которой была установлена призма связи, обеспечивала изменение угла падения излучения на основание. Вышедшее из призмы связи излучение падало на дифракционную решётку и после селекции по длине волны отражалось обратно в лазерный диод, что обеспечивало осуществление обратной связи и усиление заданной спектральной компоненты зондирующего излучения.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет осуществлять независимую перестройку частоты и угла падения излучения в области оптического контакта, что существенно упрощает настройку оптической схемы и обеспечивает эффективное возбуждение мод шепчущей галереи на заданной длине волны излучения.

Список литературы

1. Foreman M.R., Swaim J.D. et. al. // Advances in Optics and Photonics. 2015. V. 7. P. 632-634.

2. Zhang Y., Zhou T. et. al. // Nanoscale. 2018. V. 10. P. 13832-13856.

3. Shulga A.V., Khomchenko A.V. et. al. // Technical Physics Letters. 2018. V. 44 (11). P. 953-955.

УДК 535(06)+004(06)

Э.А. МИЛИКОВ[1], В.Г. СЕМЕНОВ, Ю.Ю. БРОСЛАВЕЦ,
А.А. ФОМИЧЕВ[1]
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[1]АО «ЛАЗЕКС», Долгопрудный

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ В ЧЕТЫРЁХЧАСТОТНОМ ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

Разработан ряд новых схем оптических смесителей излучения, обеспечивающих разведение лучей ортогональных круговых поляризаций на разные фотоприемники. Проведен сравнительный анализ перспектив применения разработок на практике. Исследованы возможности повышения точностных характеристик четырёхчастотного лазерного гироскопа, предложен метод компенсации остаточной магнитной составляющей ошибки измерений благодаря дополнительным сигналам, получаемым из оптического смесителя излучения и дополнительных фотоприемников.

E.A. MILIKOV[1], V.G. SEMENOV, Yu.Yu. BROSLAVETS,
A.A. FOMICHEV[1]
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny
[1]JSC «LASEX», Dolgoprudny

FOUR-FREQUENCY LASER GYROSCOPE'S SIGNALS DETECTING OPTICAL SCHEMES

A number of optical radiation mixers schemes have been developed to provide the orthogonal circular polarizations rays separation to different photodetectors. Results application comparative analysis has been held. The four-frequency laser gyroscope accuracy characteristics increasing possibilities have been investigated, a measurement error residual magnetic component compensating method is proposed using an optical radiation mixer and additional photodetectors.

Четырёхчастотные лазерные гироскопы имеют более высокий потенциал точностных характеристик, чем двухчастотные [1]. Четырёхчастотный лазерный гироскоп фактически содержит в себе два двухчастотных, работающих на волнах ортогональных круговых поляризаций, что позволяет компенсировать влияние магнитных полей на измерения, но, в то же время, существенно усложняет задачу детектирования сигналов [2]. Ранее освещение получили предложения по

компоновке оптического смесителя излучения для четырёхчастотного лазерного гироскопа из отдельных оптических деталей, таких как зеркала, фазовые пластины и поляризаторы [3]. В данной работе приведена реализация смесителя в состоящих из призм и интерференционных напылений оптических схемах, защищенных в виде результатов интеллектуальной деятельности.

Первый из предлагаемых методов разделения выходящих из четырёхчастотного лазерного гироскопа лучей заключается в использовании призм из оптически активных материалов с различием скоростей распространения волн ортогональных круговых поляризаций. Различие коэффициентов преломления использовано для геометрического разведения соответствующих им лучей [4].

Второй метод основан на применении делительного зеркала для совмещения лучей волн ортогональных круговых поляризаций с последующим пропусканием их через систему из четвертьволновой фазовой пластины и поляризатора [5]. Особенностью предложенного метода является использование сигналов с дополнительных фотоприемников, регистрирующих сигналы биений от сведения волн с одинаковым направлением обхода кольцевого резонатора четырёхчастотного лазерного гироскопа. Сигналы от дополнительных фотоприемников позволяют учесть различие магнитных чувствительностей гироскопа для волн ортогональных круговых поляризаций и обеспечить повышение точности измерений.

Полученные результаты применены в разработке экспериментального образца четырёхчастотного лазерного гироскопа в рамках выполнения ГЗ №8.12869.2018/12.1.

Список литературы

1. Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Влияние магнитного поля на дрейф зеемановского лазерного гироскопа // Труды 58-й научной конференции МФТИ.

2. Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Система формирования сигнала четырёхчастотного зеемановского лазерного гироскопа // Труды 59-й научной конференции МФТИ.

3. Семенов В.Г., Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Особенности оптического смесителя излучения кольцевого лазера с непланарным резонатором // Труды 60-й научной конференции МФТИ.

4. Брославец Ю.Ю., Миликов Э.А., Семенов В.Г., Фомичев А.А. Оптический смеситель излучения с применением призм из оптически активных материалов. Патент РФ № 2676835. Опубл. 11.01.2019. Бюл. № 2.

5. Брославец Ю.Ю., Ларионов П.В., Миликов Э.А., Морозов А.Д., Семенов В.Г., Тарасенко А.Б., Фомичев А.А. Оптический смеситель излучения четырёхчастотного лазерного гироскопа зеемановского типа. Заявка на изобретение № 2019115490 от 21.05.2019 (получено решение о выдаче патента на изобретение).

УДК 535(06)+004(06)

А.Б. УСТИНОВ, А.В. КОНДРАШОВ, А.А. НИКИТИН,
В.В. ЛЕБЕДЕВ[1], А.Н. ПЕТРОВ[1], А.В. ШАМРАЙ[1],
Б.А. КАЛИНИКОС
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

МАЛОШУМЯЩИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СВЧ-ГЕНЕРАТОР С ФИЛЬТРОМ НА СПИНОВЫХ ВОЛНАХ

Разработан и исследован оптоэлектронный СВЧ-генератор с фильтром на спиновых волнах. Изучены спектры фазового шума на различных частотах генерации для различных длин оптических волокон. Результаты показывают, что увеличение длины волокна с 200 м до 4 км уменьшает фазовый шум, стремящийся к предельному значению около – 146,5 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от частоты генерации 10 ГГц.

A.B. USTINOV, A.V. KONDRASHOV, A.A. NIKITIN,
V.V. LEBEDEV[1], A.N. PETROV[1], A.V. SHAMRAI[1],
B.A. KALINIKOS
Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
[1]*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

LOW PHASE NOISE TUNABLE OPTOELECTRONIC MICROWAVE GENERATOR BASED ON SPIN-WAVE FILTER

An optoelectronic microwave generator based on spin-wave filter was elaborated and studied. Phase noise spectra of the generator were measured experimentally for various lengths of the optical fibres. Results show that an increase in the fibre length from 200 m to 4 km reduces the phase noise tending to a limit value around – 146.5 dBc/Hz at a 10-kHz offset from a generation frequency of 10 GHz.

Одним из перспективных устройств для генерации СВЧ-сигналов является оптоэлектронный генератор [1, 2]. Такие генераторы обычно состоят из оптического и сверхвысокочастотного (СВЧ) трактов, соединенных последовательно в замкнутое кольцо. Ниже порога генерации схемы представляют собой многомодовый кольцевой резонатор. Фильтр СВЧ обычно используется для выбора частоты генерации. Для управления частотой генерации можно использовать

настраиваемые СВЧ-фильтры. До сих пор в большинстве случаев для получения широкой настройки использовались фильтры на основе сферических резонаторов из железо-иттриевого граната (ЖИГ) [3, 4]. В отличие от таких фильтров, мы предлагаем перестраивать частоту генерации спин-волновым фильтром на пленке ЖИГ [5, 6]. Целью настоящей работы являлось исследование возможностей снижения уровня фазового шума за счет увеличения длины оптоволокна.

В экспериментах использовались оптические волокна SMF различной длины от 200 м до 4 км. Вносимые потери СВЧ-сигнала, проходящего в оптическом тракте от порта модуляции электро-оптического модулятора до выхода фотодетектора, составляли 19 дБ на частоте 10 ГГц. Типичные спектры фазового шума, измеренные при частоте генерации 10 ГГц для волокон L длиной 200 м и 4 км, показаны на рис. 1. Видно, что для отстройки 10 кГц от несущей был достигнут фазовый шум -146,5 дБн/Гц для L = 4 км и -123,5 дБн/Гц для L = 200 м. Детальные исследования показали, что увеличение длины волокна с 200 м до 4 км приводит к снижению фазового шума, стремящемуся к предельному значению около -146,5 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Аналогичные значения фазового шума сохранялись при перестройке частоты генерации в диапазоне 6 - 12 ГГц.

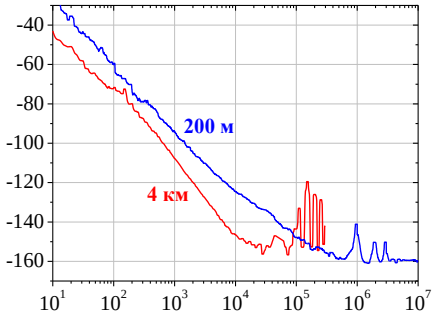


Рис. 1. Спектры фазового шума на частоте генерации 10 ГГц

Список литературы

1. Belkin M.E. et. al. // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. V. 53. P. 2474-2477.
2. Mikitchuk K., Chizh A. et. al. // IEEE J. of Quant. Electronics. 2016. V. 52. P. 1-8.
3. Eliyahu D., Maleki L. // Proc. of the 2003 IEEE Int. Frequency Control Symp. and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum. 2003. P. 405-410.
4. Zhu D., Pan S., Ben D. // IEEE Photonics Technology Letters. 2012. V. 24. P. 194-196.
5. Ustinov A.B., Nikitin A.A. et. al. // IEEE Magnetics Letters. 2015. V. 6. P. 3500704.
6. Ustinov A.B., Nikitin A A. et. al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1326. P. 012015.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. МЕЩЕРОВА
ФГУП «МНИИРИП», Мытищи

О ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВАХ РАДИОФОТОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В данной работе сделан обзор по одному из наиболее перспективных направлений развития современной радиотехники СВЧ – радиофотонике. Рассмотрены основные цели и задачи, преимущества и недостатки применения радиофотонных технологий в современных и перспективных сетях и системах телекоммуникационного и радиолокационного назначений.

D.N. MESHCHEROVA
Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments, Moscow region

ON THE FUNDAMENTAL ADVANTAGES OF MICROWAVE PHOTONICS TECHNOLOGIES

This report will provide an overview of one of the most promising directions of development of modern radio engineering microwave photonics. The main goals and objectives, advantages and disadvantages of microwave photonics technologies are considered.

В связи с развитием СВЧ-оптоэлектроники получил распространение новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой, и аналоговой компонентной базой микроэлектроники. Цели и задачи РФ: исследование и разработка сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне и их применение в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальному преимуществу радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, можно отнести следующее: фотон –

безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света, с электрическим зарядом равным нулю.

Принципиальными преимуществами использования радиофотонной технологии являются:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд),
- расширенная полоса пропускания (до терагерцевого диапазона).

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ-сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т. д.

Принципиальным недостатком использования радиофотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне.

Фотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона. Радиофотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

Применение оптических методов передачи и обработки радиочастотных сигналов в радиолокации и связи является одним из перспективных направлений. Использование методов радиофотоники при создании узлов приемопередающей аппаратуры может обеспечить значительное улучшение их основных тактико-технических характеристик: увеличение разрешающей способности по дальности и информативность, обеспечение высокой помехозащищенности и уменьшение массогабаритных характеристик. К примеру, современная РЛС представляет собой многоэтажный дом, но с применением технологий радиофотоники, станцию можно будет разместить на обычном грузовике. Достижение перечисленных преимуществ возможно благодаря внедрению функциональных узлов на основе электрооптических модуляторов, демодуляторов, источников и приемников оптического сигнала, оптических линий задержек и фазовращателей, волоконно-оптических линий связи.

Список литературы

1. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901-914.

2. Inao S., Sato T., Senstsui S., Kuroha T., Nishimura Y. Multicore optical fiber // In Optical Fiber Communication Conference, Washington, D.C., United Ststes, 6.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. ФРОЛОВЦЕВ[1], С.А. МАГНИЦКИЙ[1],
В.С. БОРМАШОВ, А.В. ДЁМИН
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИЗМЕРЕНИЕ КВАНТОВЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ БИФОТОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Рассмотрена реализация специализированного квантового томографа для измерения квантовых поляризационных состояний излучения, генерируемого бифотонными источниками. Показана возможность разработанного программного обеспечения рассчитывать томографическую и наивероятнейшую оценки матрицы плотности, а также погрешности измерения элементов матрицы плотности.

D.N. FROLOVTSEV[1], S.A. MAGNITSKIY[1],
V.S. BORMASHOV, A.V. DEMIN
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University, Russia

MEASUREMENT OF QUANTUM POLARIZATION STATES OF BIPHOTON SOURCES

The implementation of a specialized quantum tomograph for measuring the quantum polarization states of radiation generated by biphoton sources is considered. The possibility of the developed software to calculate the tomographic and the most probable estimates of the density matrix, as well as the error of the measurement of the elements of the density matrix is shown.

Измерение параметров и контроль за поляризационными состояниями излучения бифотонных источников является актуальной задачей, возникающей при разработке устройств, использующих потоки фотонов. Как было отмечено ранее [1, 2], наиболее полная информация о квантовом состоянии потока фотонов может быть получена с помощью квантовой томографии. В настоящее время разработаны различные томографические методы [3], с помощью которых можно измерить квантовые состояния световых полей, генерируемых источниками одиночных фотонов. В работе рассмотрен квантовый томограф, позволяющий измерять характеристики квантового состояния источника бифотонов на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР). Перепутанные по

поляризации фотонные пары (бифотоны) с центральной длиной волны 810 нм распространяются под углом 3 ^{0} по отношению к накачке. На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда.

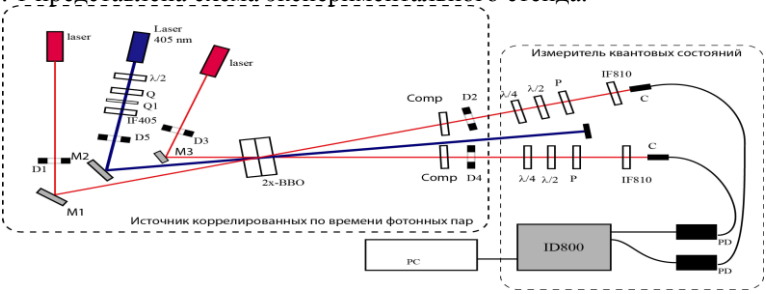


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

В работе томографа использовался протокол, предложенный в [4]. Программа написана в среде LabView. Результат характеризации источника: Линейная энтропия - 0,15 ± 0,08; Энтропия фон Неймана - 033 ± 0.11; Concurrence -0,89 ± 0,08; Tangle 0,78 ± 0,14; Перепутывание формирования - 0,84 ± 0,11.

Авторы выражают благодарность Фонду развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (стипендия № 18-2-6-189-1) и Российскому фонду фундаментальных исследований РФФИ (грант № 18-02-00849) за финансовую поддержку. Коллектив из ФГУП «ВНИИОФИ» выражает благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку проводимых исследований в рамках Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидии № 075-11-2019-072 от 29.11.2019 по теме: «Разработка компактных необслуживаемых однофотонных источников для систем противодействия киберугрозам, основанных на принципе квантового распределения ключа». Номер проекта 05.624.21.0052. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62419X0052.

Список литературы

1. Magnitskii S.A., Frolovtsev D.N., Agapov D.P., Demin A.V., Krutikov V. N., Levin G. G. Metrology of single photons for quantum information technologies // Measurement Techniques, 2017. V. 60. No. 3.

2. D'Ariano G.M., Pris M.G.A., Scchi M.F. Quantum tomography // Advances in Imaging and Electron Physics. 2003. V. 128. P. 206-309.

3. Thew R.T. et. al. Qudit quantum-state tomography // Physical Review A. 2002. V. 66. No. 1. P. 012303.

4. Kwiat P.G., Waks E., White A.G., Appelbaum I., Eberhard P.H. Ultrabright source of polarization-entangled photons // Physical Review A. 1999. V. 60. No. 2. P. 773.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БАЛАКИРЕВА, И.Ю. БЛИНОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ
Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.

КАСКАДИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА БРИЛЛЮЭНА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ

Приведены результаты теоретических исследований процесса каскадирования эффекта Бриллюэна в волоконно-оптическом лазере, в результате которого возможна генерация так называемой «оптической гребёнки». Исследована динамика снижения амплитудного шума отдельных линий Стокса при каскадировании и влияние отстроек на шумовые характеристики.

I.V. BALAKIREVA, I.Yu. BLINOV, N.P. KHATYREV
All-Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region

CASCADING THE BRILLOUIN EFFECT IN AN OPTICAL FIBER LASER

The results of the theoretical investigations of the cascaded Brillouin scattering process in an optical fiber resonator, which is a reason of the optical frequency comb generation, are presented. The dynamics of the amplitude noise of individual Stokes lines during cascaded process and the influence of detuning on the noise properties of the system are studied.

Источники оптических и СВЧ-сигналов со сверхнизкими шумами применяются в различных областях физики, таких как метрология, атомные часы, коммуникации и др. Источники таких сигналов на вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) [1, 2] вызывают интерес из-за наличия потенциала для снижения шумов при каскадировании этого эффекта. При каскадировании ВРМБ оптическая волна одной частоты (линия Стокса) из-за взаимодействия с акустической волной становится источником для генерации другой оптической волны с частотой, сдвинутой в красную область, которая в свою очередь становится источником для следующей волны и так далее. В итоге генерируется оптическая гребёнка, состоящая из линий Стокса, отстоящих друг от друга на частоту акустической волны [3]. Целью работы является исследование характеристик генерируемых линий Стокса в статическом режиме, а также их шумовых характеристик.

В результате проведённых исследований предложена математическая модель на системе уравнений связанных мод, описывающая динамику любого количества линий Стокса [4, 5]. Также были исследованы амплитудные шумы (RIN) сгенерированных линий и влияние отстроек на них. Полученные результаты сходятся с результатами, полученными в результате эксперимента [4].

Теоретические исследования предсказывают возможность снижения амплитудных шумов до 40 дБ/Гц. Результаты эксперимента показали снижение шума до 20 дБ/Гц. Такая разница объясняется наличием отстроек при проведении эксперимента. Внесение отстроек в математические расчёты скорректировали полученные теоретические данные вплоть до совпадения с экспериментальной кривой. Проведённые исследования позволяют определить оптимальные параметры для работы мульти-Стоксового лазера в режиме с низким уровнем шума. Источники сигналов на каскадном эффекте ВРМБ можно использовать для создания малошумящих оптических [6] и радиочастотных источников [7].

Список литературы

1. Ippen E., Stolen R. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. P. 539-541.
2. Smith S., Zarinetchi F., Ezekiel S. // Opt. Lett. 1991. V. 16. P. 393-395.
3. Lim D., Lee H., Kim K., Kang S., Ahn J., Jeon M.-Y. // Opt. Lett. 1998. V. 23. P. 1671-1673.
4. Sebastian A., Balakireva I.V., Fresnel S., Trebaol S., Besnard P. // Opt. Exp. 2018. V. 26 (26). P. 33700.
5. Loh W., Papp S.B., Diddams S.A. // Phys. Rev. A. 2014. V. 91. P. 053843.
6. Choudhary A., Pelusi M., Marpaung D., Inoue T., Vu K., Ma P., Choi D.-Y., Madden S., Namiki S., Eggleton B.J. // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 5074-5077.
7. Li J., Lee H., Vahala K.J. // Nat. Comm. 2013. V. 4. P. 2097.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. ЗОТОВ[1], П.В. КОРОЛЕНКО[1,2], Г.И. ЦИЦИЛАШВИЛИ[1]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ВИХРЕВЫХ ПУЧКАХ

На основе численного моделирования рассмотрены особенности распространения когерентных вихревых пучков в атмосферных каналах информационных оптических систем. Дана оценка устойчивости вихревых световых пучков с различной поперечной структурой по отношению к влиянию турбулентных образований. Дано обоснование перспективности использования многопучкового излучения.

A.M. ZOTOV[1], P.V. KOROLENKO[1,2], G.I. TSITSILASHVILI[1]
[1]*Lomonosov Moscow State University*
[2]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

HELICAL BEAM INFORMATION LASER SYTEMS

On the basis of numerical simulation, the peculiarities of the propagation of coherent vortex beams in the atmospheric optical information channels are considered. The stability of vortex light beams with different radial structure in relation to the turbulence formations is estimated. The reason of using of multibeam radiation is given.

В последнее время возрос интерес к проблеме передачи информации через атмосферу посредством использования пучков с винтовой структурой волнового фронта. При ее освещении в различных публикациях (см., например, [1-3]) особым образом подчеркивается, что такого рода вихревые волны обладают повышенной устойчивостью к влиянию атмосферной турбулентности. Несмотря на представленные в литературе сведения о свойствах вихревых пучков, ряд важных вопросов ожидает своего решения. К ним следует отнести оценку эффективности использования пучков, в которых на азимутальную винтовую структуру фазового фронта накладывается неоднородное распределение фазы в радиальном направлении. Нуждаются в более полном описании свойства многопучкового вихревого излучения [4].

Перечисленные вопросы, в основном, и определили цель и постановочную часть данной работы.

Поскольку расчеты характеристик вихревых полей в турбулентных средах связаны с большим объемом вычислений, была проведена работа по совершенствованию программного обеспечения с использованием технологии параллельных вычислений CUDA. Созданы динамические библиотеки, позволяющие вычислять распределение амплитуды на произвольном расстоянии от начальной плоскости и генерировать фазовые экраны. Распределение неоднородностей показателя преломления описывалось модифицированным фон-Кармановским экраном с параметрами, соответствующими реальной атмосферной турбулентности. Ускорение расчетов позволило получить в экспресс-режиме статистически достоверные результаты.

Радиальная и азимутальная структура поля исходного пучка в полярных координатах r, φ в начальной плоскости задавались с помощью Лагеро-Гауссовых мод с индексами l и p.

$$E_{l,p}(r,\varphi) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(|l|+p)!}}\left[\frac{r\sqrt{2}}{w_0}\right]^{|l|} L_p^l\left(2\frac{r^2}{w_0^2}\right)\frac{1}{w_0}\exp\left(2\frac{-r^2}{w_0^2}\right)e^{il\varphi},$$

где L^i_p – обобщенный полином Лагера, w_0 – параметр ширины пучка.
При моделировании прохождении Лагеро-Гауссовых мод через атмосферные неоднородности было показано, что среднеквадратичное отклонение центра масс на приемной апертуре зависит как от азимутальной, так и от радиальной структур пучка. Причиной такой зависимости, по всей видимости, является возрастающая с индексами моды эффективная ширина пучка. Однако при привидении ширины моды к одному значению оценка среднеквадратичного отклонения центра масс пучка остается достаточно неоднозначной.

В ходе моделирования также было показано, что фазовое возмущение моды и дальнейшее ее дифракционное распространение приводит к ее ослаблению и частичному распаду на, преимущественно, соседние моды с близкими индексами. Учет характеристик устойчивости таких мод имеет важное прикладное значение при передаче информации по открытым каналам распространения.

Список литературы

1. Wang X., Nie Z. et. al. // Nanophotonics. 2018. V. 7. P. 1533.
2. Zhu F., Huang S. et. al. // Optics communications. 2017. V. 396. P. 50.
3. Aksenov V.P., Pogutsa Ch.E. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. V. 26. P. 13-17.
4. Аверченко А.В., Зотов А.М., Короленко П.В., Павлов Н.Н. // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. С. 21-25.

УДК 535(06)+004(06)

Л.А. БОЛЬБАСОВА[1,2], А.Н. ГРИЦУТА[1,2] , В.П. ЛУКИН[1]
[1]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШЭКА–ГАРТМАНА ДЛЯ РАБОТЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Представлена практическая реализация датчика волнового фронта Шэка–Гартмана функционирующего в широком диапазоне изменения величины оптической турбулентности атмосферы. Оригинальное конструкторское решение датчика позволяет выполнять замену микролинзового растра с различным с фокусным расстоянием от 2.5 мм до 5 см, в результате изменяя динамический диапазон и чувствительность. Представлены экспериментальные результаты тестирования датчика. Обсуждаются практические аспекты использования датчика для атмосферных измерений связанные с параметрами матрицы микролинз.

L.A. BOLBASOVA[1,2], A.N. GRITSUTA[1,2], V.P. LUKIN[1]
[1]*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk*
[2]*National Research Tomsk State University*

SHACK–HARTMANN WAFEWRONT SENSOR FOR USING IN WIDE RANGE OF CHANGE OF ATMOSPHERIC TURBULENCE CHARACTERISTICS

The practical implementation of the Shack-Hartmann wavefront sensor for operation in a wide range of atmospheric turbulence is presented. The original design solution of the wavefront sensor allows the replacement of a lenslet array with different focal lengths from 2.5 mm to 5 cm. In results dynamic range and sensitivity of the wavefront sensor are changed. Experimental results of testing the sensor are presented. The practical aspects of the use connected with lenslet array of the sensor for atmospheric measurements are discussed.

Датчик волнового фронта Шэка–Гартмана (ДВФ Ш-Г) являясь основным элементом систем адаптивной оптики, характеризуется тремя зависимыми между собой через фокусное расстояние микролинз параметрами это динамический диапазон, чувствительность и точность. Области применения и задачи адаптивной оптики достаточно разнообразны: астрономия, биомедицина, лазерные системы. В результате требования, предъявляемые к ДВФ, могут существенно отличаться в зависимости от решаемой задачи. Например, использование ДВФ Ш-Г для

астрономических приложений требует высокой чувствительности и точности, в то время как динамический диапазон может быть уменьшен, а для систем фокусировки лазерного излучения необходимы большой динамический диапазон и чувствительность [1]. Это приводит к необходимости проектирования ДВФ индивидуально.

В работе представлен разработанный из типовых оптомеханических элементов ДВФ Ш-Г с изменяемыми динамическим диапазоном и чувствительностью. Поскольку диапазон измеряемых значений датчиком волнового фронта Ш-Г определяется угловыми полем зрения ДВФ или максимальными/минимальными регистрируемыми угловыми смещениями изображения каждой микролинзы. То в результате замена микролинзового растра с различным размером микролинз и фокусным расстоянием от 3000 мкм до 5 см, позволяет обеспечить функционирование ДВФ Ш-Г в широком диапазоне изменения величины аберраций в зависимости от условий работы адаптивной оптической системы.

На рис. 1 представлен разработанный ДВФ Ш-Г на стенде адаптивной оптики. Это компактный прибор, снабженный необходимыми юстировочными узлами для матрицы микролинз и видеокамеры, изготовлен по каркасной системе, что позволяет легко сопрягать с другими элементами оптической системы, и гарантирует, что оптические элементы, размещенные внутри, имеют общую оптическую ось. Микролинзовый растр – матрица дифракционных линз на круглой пластине 10 мм (рис. 2). Тестирование ДВФ выполнено в соответствии с ГОСТ [2], а также в контуре адаптивной оптической системы. Сделаны оценки максимальных/минимальных значений атмосферной турбулентности для эффективной работы ДВФ в системе адаптивной оптики в зависимости от параметров микролинзового растра.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 17-79-20077).

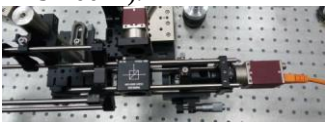


Рис. 1. Фотография ДВФ Ш-Г на стенде адаптивной оптики

Рис. 2. Фотография сменных микролинзовых растров

Список литературы

1. Curatu C., Curatua G., Rolland J. // Proc. SPIE. 2006. V. 6288 P. 628801.

2. ГОСТ Р ИСО 15367-2-2012. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерения формы волнового фронта пучка лазерного излучения. Ч. 2 Датчики Шока-Гартмана. М.: Стандартинформ, 2013.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

ПОВЫШЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО КОНТУРА КОЛЬЦЕВОГО МОНОБЛОЧНОГО ГИРОСКОПА

В работе представлена и исследована модель конструктивно-технологического решения кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом (КМГ с ЛД) с повышенной добротностью, отличающаяся включением в оптический контур высокодобротных оптических резонаторов по типу Фабри-Перо. Модель реализована с применением векторно-матричного аппарата основу, которого составляет - закон ABCD матрицы.

N.A. US, A.A. AVERSHIN
Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A Gagarin, Voronezh

INCREASE OF GOOD QUALITY OF OPTICAL CONTOUR OF THE RING MONOBLOCK GYROSCOPE

In work the model of the constructive and technological solution of a ring monoblock gyroscope with the laser diode (KMG with LD) with the increased good quality differing in inclusion in an optical contour of high-sound optical resonators as Fabri-Perot is presented and investigated. The model is realized with use of the vector-matrix device a basis whom makes - the law ABCD of a matrix.

Анализ конструктивно-технологического решения КМГ с ЛД указывает на скрытые потенциальные возможности его оптической схемы. Разработанный способ повышения добротности оптической схемы заключается в трансформации технологических областей с зеркалами полного отражения в высокодобротные оптические резонаторы типа Фабри-Перо, в которых резонансная длина волны равна рабочей длине волны гироскопа, т.е. равна рабочей длине волны лазерного диода. На рис. 1 представлена разработанная треугольная оптическая схема КМГ с ЛД с дополнительными высокодобротными цилиндрическими оптическими резонаторами на основе базовой конструкции гироскопа данного типа [1].

При нахождении оптимальной конструкции оптической схемы КМГ следует учитывать одно из главных свойств резонаторов – сохранять энергию электромагнитных колебаний, определяемых понятием добротность. В оптическом диапазоне используются открытые объемные

резонаторы, в которых поле не полностью замкнуто металлической оболочкой. Такие резонаторы отличаются высокими значениями добротности. Потери в таких резонаторах определяются затуханием волны, дифракцией на его концах и неидеальным отражение от поверхности зеркал, но они значительно меньше, чем в просто объемных резонаторах. Для нахождения добротности оптической схемы КМГ с ЛД получено следующие выражение:

$$Q = \frac{2\pi q}{4L\alpha + p_{дифр} + (1-|\Gamma_1|^2) + (1-|\Gamma_2|^2)}, \quad (1)$$

где q – положительное целое число, L – длина оптического пути, α – коэффициент затухание оптической волны, $p_{дифр}$ – относительные дифракционные потери мощности оптического излучения на краях зеркал, *Г1, Г2* – коэффициент отражения излучения от зеркал по мощности [2, 3].

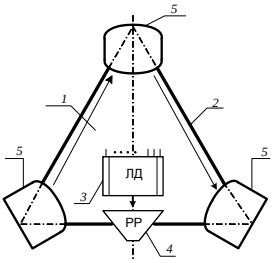


Рис. 1. Треугольная оптическая схема кольцевого лазерного гироскопа с дополнительными высокодобротными цилиндрическими оптическими резонаторами: 1 – моноблок, 2 – оптические каналы, 3 – лазерный диод, 4 – резонатор-расщепитель, 5 – высокодобротные цилиндрические оптические резонаторы

Список литературы

1. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н. Способ повышения добротности оптического контура кольцевого моноблочного лазерного гироскопа // Положительное решение на выдачу патента. Заявка от 31.10.18 №2018138304.

2. Ус Н.А., Авершин А.А. Математическая модель оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа // Труды МАИ. 2018. № 103.

3. Авершин А.А., Ус Н.А. Расчет добротности оптического контура кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660692. 28.08.2018.

УДК 535(06)+004(06)

К.Б. ЮШКОВ, В.П. ЗАРУБИН, С.Н. МАНЦЕВИЧ[1],
В.Я. МОЛЧАНОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РАЗРАБОТКА АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДИСПЕРСИОННЫХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В работе рассмотрены практические аспекты создания акустооптических дисперсионных линий задержки для управления формой фемтосекундных лазерных импульсов. Проанализированы физические ограничения предельного спектрального разрешения приборов. Разработана и создана линия задержки для широкополосного лазерного излучения (до 200 нм на центральной длине волны 800 нм) на кристалле парателлурита с длиной 80 мм со спектральным разрешением 0,24 нм.

K.B. YUSHKOV, V.P. ZARUBIN, S.N. MANTSEVICH[1],
V.Ya. MOLCHANOV

National University of Science and Technology MISIS, Moscow
[1]Lomonosov Moscow State University

DEVELOPMENT OF HIGH-DEFINITION ACOUSTO-OPTIC DISPERSIVE DELAY LINES

We observe practical aspects of design of acousto-optic dispersive delay lines for femtosecond laser pulse shaping. Physical limitations on spectral resolution of this device type are analyzed. The dispersive delay line was designed and fabricated for broadband laser emission (up to 200 nm bandwidth at 800 nm). The delay line was based on a 80-mm-long paratellurite crystal and had the resolution of 0,24 nm.

Программируемое управление формой импульсов в фемтосекундных лазерных системах является одной из актуальных практических задач [1]. Одним из наиболее эффективных способов управления ультракороткими импульсами являются акустооптические дисперсионные линии задержки на основе квазиколлинеарной геометрии дифракции в парателлурите [2, 3]. Во многих задачах, таких как спектральное кодирование/декодирование, формирование реплик или заданной временной огибающей ультракоротких лазерных импульсов [3-5] требуется максимально высокое спектральное разрешение. Увеличение разрешения акустооптической дисперсионных линий задержки

достигается двумя путями: 1) оптимизацией геометрии акустооптического взаимодействия; 2) использованием кристаллов с большой длиной.

Типичная длина акустооптического взаимодействия в квазиколлинеарных дисперсионных линиях задержки составляет 60 мм. При увеличении длины взаимодействия основным ограничением характеристик прибора является объемное поглощение ультразвука и вызванный им неоднородный нагрев кристалла. Измерения, выполненные лазерно-ультразвуковым методом [6], показали, что градиент температуры в кристалле парателлурита в основном направлен только вдоль кристалла и разница температур на концах кристалла может превышать 25 К, в то время как поперечный градиент практически отсутствует. Модель одномерного распределения температуры также хорошо описывает искажения аппаратной функции фильтра, наблюдаемые экспериментально.

На основании выполненной оптимизации геометрии и конструкции была разработана и изготовлена акустооптическая дисперсионная линия задержки с длиной акустооптического взаимодействия 80 мм (рис. 1). Максимальная мгновенная ширина обрабатываемого спектра лазерного излучения составляет 200 нм при спектральном разрешении 0,24 нм. Эффективность дифракции для спектра шириной 120 нм превышает 90 % при пиковой мощности радиосигнала 7,6 Вт (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-07-00672).

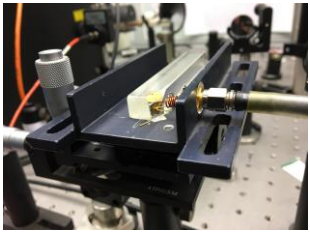


Рис. 1. Фотография дисперсионной линии задержки

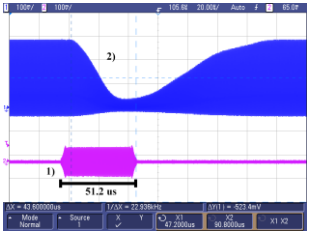


Рис. 2. Осцилограмма измерения эффективности дифракции: ВЧ сигнал (1); интенсивность нулевого порядка дифракции (2)

Список литературы

1. Weiner A.M. // Opt. Commun. 2011. V. 284(15). P. 3669.
2. Molchanov V.Ya. et. al. // Appl. Opt. 2009. V. 48(7). P. C118.
3. Molchanov V.Ya. Yushkov K.B. // Opt. Express. 2014. V. 22(13). P. 15668.
4. Yushkov K.B. et. al. // Opt. Lett. 2016. V. 41(23). P. 5442.
5. Yushkov K.B. et .al. // Phys. Rev. A. 2017. V. 94(4). P. 043866.
6. Zarubin V.P. et. al. // NDT & E Int. 2018. V. 98. P. 171.

УДК 535(06)+004(06)

В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ С МАЛЫМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Предложен акустооптический (АО) фильтр пространственных частот с малым потреблением акустической мощности. Фильтр основан на использовании АО брэгговской дифракции в два симметричных порядка, при этом потребление акустической мощности в два раза меньше потребления мощности «обычных» брэгговских ячеек. На основе фильтра, изготовленного из парателлурита и работающего на частоте звука 37 МГц, получено выделение двумерного контура изображения, переносимого светом с длиной волны 0.63 мкм.

V.M. KOTOV, S.V. AVERIN
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

ACOUSTO-OPTIC FILTER OF THE SPATIAL FREQUENCIES WITH LOW CONSUMPTION OF ACOUSTIC POWER

An acousto-optic (AO) filter of the spatial frequencies with the low consumption of the acoustic power is suggested. The filter operation is based on the using the AO Bragg diffraction into two symmetric orders, by this the acoustic power consumption is into two times smaller than the consumption in “common” Bragg cells. The two-dimensional image edge enhancement is obtained by the using of the filter from paratellurite operated at the acoustic frequency 37 MHz. The light wavelength of the image is 0.63 μm.

Оптическая фурье-обработка изображений существенным образом определяется характеристиками фильтра пространственных частот. В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик акустооптического (АО) фильтра, основанного на дифракции в два брэгговских порядка. Достоинствами фильтра являются малое потребление акустической энергии в сравнении с потреблением энергии в «классических» брэгговских ячейках, а также широкая полоса работы фильтра. Распределение поля «рабочего» порядка неоднородно, что характерно для фильтров, основанных на сложении нескольких оптических полей [1]. На рис. 1 представлена передаточная функция фильтра нулевого брэгговского порядка, на рис. 2 – исходное

изображение в виде цифры «3» (слева) и результат после FFT-обработки изображения (справа) с использованием распределения рис. 1 в качестве фильтра пространственных частот. Видно, что изображение после FFT-обработки является достаточно хорошо выраженным 2-D контуром исходного изображения.

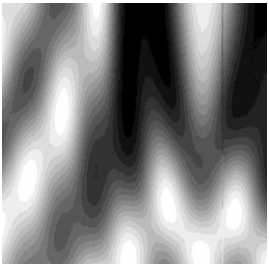


Рис. 1. Распределение поля в нулевом брэгговском порядке

Рис. 2. Исходное изображение (слева) и изображение после FFT-обработки (справа)

Полученный теоретический результат подтвержден рядом экспериментов на основе оптической фурье-обработки изображений с использованием АО фильтра из парателлурита, работающего на частоте поперечного звука 37 МГц. Изображения передавались оптическим излучением с длиной волны 0.63 мкм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00259 и грант № 19-07-00071).

Список литературы

1. Kotov V.M., Averin S.V., Kotov E.V., Shkerdin G.N. Acousto-optic filters based on the superposition of diffraction fields [invited] // Applied Optics. 2018. V. 57. No. 10. P. C83-C92.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. БОРИТКО, Я.С. БОРИТКО[1]
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
[1]Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ В СЛОЖНЫХ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

На примере разработанного в НТЦ Уникального приборостроения РАН акустооптического спектрометра комбинационного рассеяния показана возможность достоверной неразрушающей диагностики драгоценных камней в сложных ювелирных изделиях, а также исследования спектральных особенностей натуральных и синтетических кристаллов.

S.V. BORITKO, Ya.S. BORITKO[1]
Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow
[1]Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow

USAGE OF RAMAN SCATTERING FOR GEMSTONES DIAGNOSTICS IN COMPLEX JEWELRY

The possibilities of reliable non-destructive gemstone diagnostics in complex jewelry and studying the spectral features of natural and synthetic crystals are shown using the acousto-optical Raman scattering spectrometer developed at the Scientific and Technical Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Science.

Многие физические методы, используемые для исследования твердых тел, базируются на измерении расстояния между энергетическими уровнями того или иного рода. Так как любое твердое тело состоит из атомов жестко связанных между собой, то для такой системы характерны коллективные колебания с определенным и частотами, называемыми характеристическими. Следовательно, если облучать такое вещество с помощью одночастотного источника света, то в спектре рассеянного света будут существовать не только спектральная линия источника света (релеевская линия), но и другие линии, имеющие смещенные частоты по сравнению с возбуждающей (линии комбинационного рассеяния). Причем для последних число, спектральное положение, ширина и интенсивность тесно связаны как с вещественным составом, так и с атомной структурой рассеивающего объекта. Не случайно спектр комбинационного рассеяния называют «отпечатком пальца» веществ.

В работе рассмотрена возможность создания установки для диагностики драгоценных камней, основанной на анализе спектров комбинационного рассеяния. Следует отметить, что в ювелирной практике издавна использовали всевозможные имитации и подделки. В конце XIX века был открыт синтез драгоценных камней, а с 1902 года французский химик М.А. Вернель начал поставлять на рынок синтетические рубины, а чуть позже – сапфиры и шпинель. Таким образом, задача достоверной диагностики (т.е. определения) драгоценного камня (особенно в сложном ювелирном изделии) стоит довольно остро и ее значимость, по мере дальнейшего развития новейших технологий синтеза новых материалов, будет только возрастать.

Для использования в задачах диагностики спектрометр должен иметь высокую чувствительность, достаточно высокие спектральное разрешение и спектральный контраст. Этим требованиям удовлетворяет спектрометр на основе акустооптических фильтров. Разработанный спектрометр состоит из излучающей части – зеленого лазера (λ = 532 нм) и приемной части, включающей оптический блок и блок управления, а также волоконно-оптического зонда, необходимого для освещения исследуемого объекта и приема рассеянного излучения. Спектрометр управляется от любого персонального компьютера через USB порт.

Когда речь заходит о драгоценных камнях в первую очередь говорят о бриллиантах, т.е. ограненных алмазах. Кристаллы алмаза имеют кубическую решетку, в которой атомы углерода связаны между собой сильными ковалентными связями. Для таких кристаллов характерно одно групповое колебание и, следовательно, в спектре комбинационного рассеяния присутствует только один ярко выраженный пик, уширенный в меру теплового колебания решетки. Наиболее близким имитатором алмаза является фианит, который был синтезирован в 1972 году в Физическом институте Академии наук. По химическому составу фианит представляет собой окись циркония и гафния с добавками редкоземельных элементов – эрбия, кобальта, ванадия, хрома и железа, что приводит к образованию нескольких частот групповых колебаний и, следовательно, более богатому спектру комбинационного рассеяния. При проведении работы, помимо ювелирных изделий, был исследован ряд натуральных (корунд, шпинель, турмалин, топаз, берилл, горный хрусталь) и искусственных (ИАГ, фабулит, рутил, ниобат лития, титанат стронция) имитаторов алмаза, любезно предоставленных хранилищем государственного «Геологического музея» им. В.И. Вернадского (Москва).

УДК 535(06)+004(06)

А.Ю. БЫКОВСКИЙ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

СТРУКТУРА ПРОТОКОЛОВ КВАНТОВОЙ СЕТИ

Концепции сетей поколения 6G предполагают не только интеграцию ВОЛС и линий квантового распределения ключа, но и широкое внедрение систем искусственного интеллекта, Интернета вещей (IoT) и различных видов роботов. Для реализации одноранговых (P2P) сегментов таких сетей необходимы усложненные логические модели агентов, для обучения и отладки которых предлагается использовать многозначно-логические переключательные функции, эмулирующие нейросетевые, нечеткие и традиционные вычисления.

A.Yu. BYKOVSKY
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

THE STRUCTURE OF QUANTUM NETWORK PROTOCOLS

Concepts of quantum networks 6G suppose not only the integration of fiber optics and quantum key distribution lines, but also wide implementation of AI systems, Internet of things (IoT) and various types of robots. The realization of peer-to-peer (P2P) segments of such networks needs to design complicated logical models of agents, whose learning and debugging is proposed to be based on multiple-valued logic switching functions, emulating neural networks, fuzzy logic and traditional computing.

Современные разработки квантовой криптографии и квантовых вычислений на базе сетей 5G и 6G [1] предполагают широкое использование методов искусственного интеллекта (ИИ) и нейросетевого обучения для управления интеллектуальными роботами и Интернетом вещей (IoT). Для этого необходимо усложнять структуру сетевых протоколов, что демонстрируют некоторые известные квантовые архитектуры [2], представленные в табл. 1 в сравнении с моделью OSI.

В данной работе обсуждается совместная работа программных и аппаратных агентов на уровне сегментов одноранговой сети (P2P), встроенных в традиционную сеть. Рассматривается выделенный уровень мультиагентных сетевых протоколов (см. табл. 1), ориентированный, в частности, на интеграцию нейросетевой системы зрения. Гетерогенная модель поведения агентов базируется на переключательных функциях дискретной многозначной алгебры Аллена-Живона, обучение и отладка которой предполагает эмуляцию нейросетевой модели глубокого обучения в виде набора минтермов. В том числе, один слой нейросети можно

записать в виде операторов многозначной логики (1), где Σ – обозначает оператор MAXIMUM, Π – оператор MINIMUM, X_i – оператор Literal с параметрами a,b, W_k – весовой коэффициент, C_{m-1} – константы:

$$F(x_1, \dots, x_n, w_1, \dots, w_n) = \sum_{m=1}^{n-1} C_{m-1} \prod_{i=1}^{n} X_i(a_{1i}, b_{1i}) \prod_{k=1}^{n} W_k(a_{1k}, b_{1k}). \quad (1)$$

Предлагаемый подход позволяет описать модель взаимодействия робота и управляющего компьютера для расширенного набора алгоритмов обработки данных и знаний, включая результаты измерений квантовых переменных.

Таблица 1. Структура квантовых протоколов по сравнению с моделью OSI

Уровни модели OSI	Фотонная сеть	Сетецентрическая система	Предлагаемая модель агента для одноранговой сети
-	Центр управления ключами	-	-
-	Мультиагентная система управления ключами	-	МЗЛ код описания задач агента и МЗЛ модель его обучения
Представление данных и шифрование	Набор квантовых и классических протоколов шифрования	Схема КРК “звезда” с “доверенным лицом” и “доверенным центром сертификации”	Интеграция известных схем КРК и помехозащищенного МЗЛ кодирования
Работа с физической средой передачи сигналов и данных	Протокол КРК BB84, Оптическая сеть перекрестных переключателей	Протокол КРК BB84, Неквантовые протоколы	Интеграция протокола КРК в МЗЛ модель агента

Список литературы

1. Soldano D, Manzalini A. // IEEE Veh. Technol. Mag. 2015. V. 10. P. 32.
2. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48 (9). P. 777.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ПАВЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВО-ПОДОБНЫХ КОГНИТИВНЫХ ФЕНОМЕНОВ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ: ДИЛЕММА ЗАКЛЮЧЕННОГО

Показано, что когнитивный феномен, демонстрирующий на примере дилеммы заключенного нарушение классического закона полной вероятности, может быть реализован при построении логики с исключением методом голографии Фурье.

A.V. PAVLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

QUANTUM-LIKE COGNITIVE PHENOMENA MODELING BY HOLOGRAPHIC TECHNIQUE: PRISONER'S DILEMMA

It is shown, the violation of total probability law is modeled by 6*f* Fourier holography setup, implementing the prisoner's dilemma by logic with exception.

Сегодня вновь возрос интерес к вопросу о наличии квантовой природы у мозга и мышления [1, 2]. Толчок дал успех в квантово-логическом описании [3] когнитивных феноменов, демонстрирующих нарушение при рассуждениях законов классических логики и вероятности [4, 5]. Но этот формализм не подкрепляет физически гипотезу о квантовой природе.

В работах [6, 7] показан классический механизм феномен «Линда» за счет нелинейности чувствительности регистрирующих сред. В данном докладе показано, что другой феномен: нарушение закона полной вероятности на примере дилеммы заключенного [4] также может быть реализован классическим методом голографии Фурье.

Суть дилеммы в принятии игроком *B* одного из дополнительных решений *D* или *C* при условии, что игрок *A* решает задачу независимо. Классическая формула полной вероятности для игрока *B* дает вероятность решения *D* при отсутствии информации о действии *A* в интервале между вероятностями решений при известных действиях *A*. Но эксперименты показали [4, 5] устойчивое расхождение с теорией: $P\left(B_D\right) = P\left(B_D \middle| A_C\right)$.

Наш подход основан на описании задачи логикой с исключением, реализуемой *6f* схемой голографии Фурье [8], рис. 1. Принятие решения при отсутствии информации о действии *A* описывается монотонной

логикой, реализуемой 4*f* схемой (на рис. 1 обведена пунктиром): предать – выгодно. Эта логика дана на рис.2 кривой 1, где V_{in} – отношение радиусов спектров амплитуд образов «предать» и «молчать», оценка решения – радиус глобального максимума корреляционной функции (ГМ КФ).

Новая информация о действиях *A* записывается на голограмме H^C. Отклики схемы на 1-й итерации (оценка действий *A*): 2 выше 3 (*A* молчит – это хорошо). Оценка собственного решения *B*: 5 выше 4, т.е. имеем логику игрока *B* при наличии у него информации о молчании *A* (в состоянии когнитивного диссонанса): «предать – лучше, чем молчать».

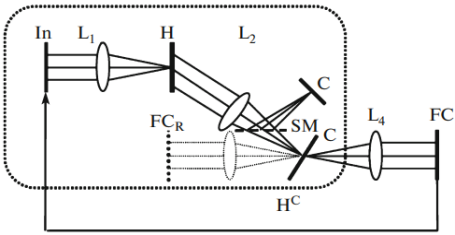


Рис. 1. 6*f*-схема голографии Фурье: L_1, L_2, L_3, L_4 – фурье-преобразующие линзы, H и H^c – голограммы основного правила и исключения, In и C – плоскости входная и корреляций, SM – светоделитель, FC_R – эталон для записи H^C

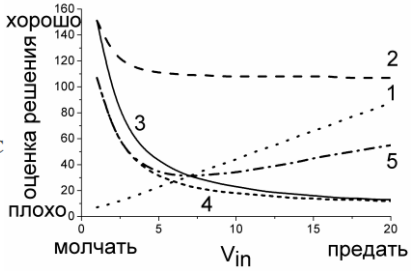


Рис. 2. Оценка решений (радиусы ГМ КФ): 1 – монотонная логика; 2, 3 – 1-я итерация ЛИ, решения *D* и *C*, соответственно; 4 и 5 – 2-я итерация ЛИ, решения *D* и *C*, соответственно

Таким образом, 6*f* схема голографии Фурье, реализующая логику с исключением, включая когнитивный диссонанс и этап его редуцирования, моделирует экспериментально наблюдаемые нарушения классической формулы полной вероятности применительно к «дилемме заключенного» без необходимости обращения к квантовым механизмам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-01-00676-а.

Список литературы

1. Menskii M.B. // Phys. Usp. 2005. V. 48(4). P. 389-409.
2. Zheltikov A.M. // Phys. Usp. 2018. V. 61(10). P. 1016-1025.
3. Pothos E.M., Busemeyer J.R. // Proc. R. Soc. B. 2009. V. 276. P. 2171-2178.
4. Shafir E., Tversky A. // Cogn Psych. 1992. V. 24. P. 449-474.
5. Tversky A., Shafir E. // J Psychol. Sci. 1992. V. 3. P. 305-309.
6. Pavlov A.V., Orlov V.V. // Quantum Electronics 2019. V. 49(3). P. 246-252.
7. Pavlov A.V. // Quantum Electronics. 2019. V. 49(6). P. 777-778.
8. Pavlov A.V. // Optics and Spectroscopy. 2015. V. 119(1). P. 146-154.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ШИПКО
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ВИДЕ МНОГОМЕРНЫХ ЛОКАЛЬНО ОДНОРОДНЫХ И ИЗОТРОПНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

В работе предложена модель представления и описания гиперспектральных данных в виде многомерных локально однородных и изотропных случайных полей, что открывает возможность анализа таких данных в рамках корреляционной теории процессов со случайными стационарными приращениями.

V.V. SHIPKO
Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A Gagarin, Voronezh

MODEL OF SUBMISSION OF HYPER SPECTPAL DATA IN THE FORM OF MULTIDIMENSIONAL LOCALLY UNIFORM AND ISOTROPIC CASUAL FIELDS

In work the model of representation and the description of hyper spectral data in the form of multidimensional locally uniform and isotropic casual fields is offered that opens a possibility of the analysis of such data within the correlation theory of processes with casual stationary increments.

Как известно [1], гиперспектральные данные (изображения) позволяют извлекать полезную информацию о пространственно-спектральных характеристиках различных объектов и используются для решения задач контроля загрязнений окружающей среды, в картографии, исследовании природных ресурсов, климатологии, океанографии, в лабораторных исследованиях, в военных целях и т.д.

Важной отличительной особенностью гиперспектральных данных является их высокая межкомпонентная коррелированность в соседних, и не только, спектральных компонентах. Однако большинство объектов и их фонов имеют спектрально селективные отражательные характеристики в спектральных компонентах гиперспектрального изображения, а также имеет место аддитивная шумовая составляющая.

На рис. 1 в качестве примера представлены значения яркости соответствующих строк двух спектрозональных компонент ($l = 1$ и $l = 30$) гиперспектрального изображения. Как видно из рис. 1, значения яркости в спектрозональных компонентах значительно различаются, (например, на

участке $j = 100, \ldots, 105$). На рис. 2 показаны спектральные яркости пикселей λ^l_{100}, λ^l_{105} и их градиенты (разности) $\Delta^l_{100-105} = \lambda^l_{100} - \lambda^l_{105}$.

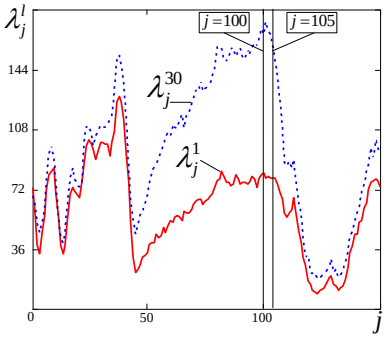


Рис. 1. Сечения двух спектрозональных изображений

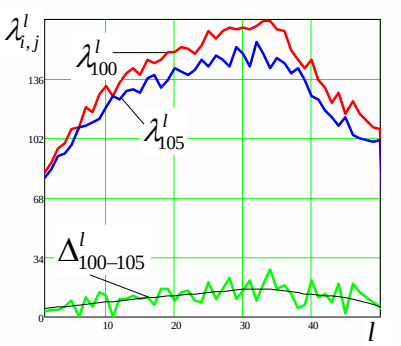


Рис. 2. Спектральные яркости двух пикселей и их градиенты

Из представленного на рис. 1 и 2 примера видно, что при разных и изменяющихся яркостях пикселей на заданном спектральном диапазоне их градиенты имеют стабильные (стационарные) значения. Стоит отметить, что для случая градиента относительно удаленных пикселей может наблюдаться медленный ход их среднего по спектру, обусловленный неоднородностью (перепад яркости). При этом для близлежащих пикселей стабильность их градиентов достаточно высокая. Также высокая стабильность может наблюдаться и у удаленных составляющих градиента на однородной текстуре изображения.

Таким образом, открывается возможность анализировать и разрабатывать алгоритмы обработки гиперспектральных изображений на основе корреляционной теории процессов со стационарными приращениями [2], и распространить ее на случай многомерных локально однородных и изотропных случайных полей.

Список литературы

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли /под ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015.

2. Яглом А.М. Корреляционная теория процессов со случайными стационарными n-ми приращениями // Математический сборник. 1955. Т. 37(79). № 1. С. 141-196.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. КОРОЛЕНКО[1,2], Д.Д. РУЖИЦКАЯ[1],
С.Б. РЫЖИКОВ[1], Ю.В. РЫЖИКОВА[1]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ФРАКТАЛОПОДОБНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены особенности спектральных характеристик фракталоподобных систем. Особое внимание уделено проблеме устойчивости соотношений скейлинговых характеристик фрактального объекта и его фурье-образа. Полученные результаты дают физическую интерпретацию некоторым положениям нейроэстетики.

P.V. KOROLENKO[1,2], D.D. RUZHITSKAYA[1],
S.B. RYZHIKOV[1], Yu.V. RYZHIKOVA[1]
[1]*Lomonosov Moscow State University*
[2]*Lebedev Physical Institute of theRAS, Moscow*

FEATURES SPECTRAL ANALYSIS OF FRACTAL-LIKE SYSTEMS

The spectral characteristics of fractal-like systems are considered. Particular attention is paid to the problem of fractal characteristics stability of the object and the Fourier transform. The results provide a physical interpretation of some neuroaesthetics aspects.

Несмотря на широкое распространение спектрального анализа фрактальных объектов [1], базирующегося на выполнении пространственного преобразования Фурье, вопрос об устойчивости и характере связи структурных характеристик объекта с распределением его пространственных частот остается малоизученным. Литературные сведения [2, 3] указывают на необходимость учета специфики отдельных видов фракталов. Условно их можно разбить на три группы. Фракталы первой группы характеризуются наличием одного постоянного коэффициента скейлинга как в структуре, так и в фурье-спектрах. Фракталам второй группы присуще различие коэффициентов скейлинга в геометрии фрактала и его фурье-образе. К третьей группе относятся фракталоподобные объекты, которые не обладают фрактальностью фурье-спектров. Целью данной работы является оценка устойчивости фурье-

образов фрактальных структур различных групп (рис. 1), что позволяет дополнить критерии их идентификации.

Результаты моделирования свойств фракталов, относящихся к указанным группам, показали, что скейлинговые характеристики решетчатой структуры Фибоначчи (рис. 1*а*) и ее фурье-образа обладают однозначным соответствием. Такое соответствие отсутствует у дендритного образования (рис. 1*б*). Фурье-преобразование множества Мандельброта (рис. 1*в*) не несет явно выраженных самоподобных элементов. Однако фурье-преобразование пространственного спектра этого множества обладает фрактальностью. Расчеты фракталоподобных структур дополняет ранее полученные результаты [2-7] и указывает на возможность их использования при диагностике самоподобных изображений, а также расширить возможности применения фрактального анализа в трансдисциплинарных технологиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00723 а.

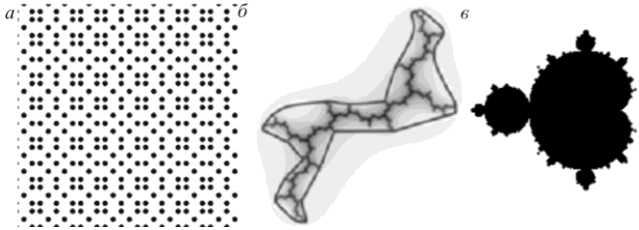


Рис. 1. Примеры исследуемых объектов: 2D решетка Фибоначчи (*а*), дендрит (*б*), множество Мандельброта (*в*)

Список литературы

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: «Институт компьютерных исследований», 2002.

2. Гридчина В.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 12. С. 1691-1694.

3. Ковальчук М.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2015. № 1. С. 151401.

4. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В. Конструктивные методы алгебры логики, атомарных функций, вейвлетов, фракталов в задачах физики и техники. М.: Техносфера, 2018.

5. Ryzhikova Yu., Mukhartova Iu., Ryzhikov S. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1141. P. 012059.

6. Зотов А.М., Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжикова Ю.В. // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика, астрон. 2019. № 6. С. 51-56.

7. Короленко П.В., Логачев П.А., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 3. С. 66-71.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БЛАНК, А.А. НАСОНОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕПАРАКСИАЛЬНЫХ ВЕКТОРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ

Обсуждаются результаты строгого анализа пространственной структуры векторных волновых пучков. Представлены соотношения продольных и поперечных компонент напряженности электрического поля, поляризационные характеристики пучка и методы их исследования на основе тензоров структуры второго ранга для профиля распределения интенсивности.

A.V. BLANK, A.A. NASONOV
Lomonosov Moscow State University

DIFFERENTIAL ANALYSIS OF NON-PARAXIAL VECTOR WAVE BEAMS

The results of a rigorous analysis of the spatial structure of vector wave beams are discussed. The ratios of the longitudinal and transverse components of the electric field, the polarization characteristics of the beam, and methods for analyses based on the second rank tensors of the structure for the intensity distribution profile are presented.

Представлены результаты анализа пространственной структуры гауссова волнового пучка в скалярном, псевдовекторном [1] и векторном приближениях [2]. Особое внимание уделено взаимосвязи продольной и поперечной компонент вектора напряженности электрического поля, а также трансляционной и ротационной компонент вектора Умова-Пойнтинга. Как векторный, так и псевдовекторный волновые пучки строго удовлетворяют системе уравнений Максвелла и не могут рассматриваться в параксиальном приближении из-за отклонения вектора Умова-Пойнтинга от оси. Вектор напряженности электрической составляющей электромагнитного поля пучка, распространяющегося в направлении x_3 в приближении поляризации в плоскости x_1x_3 характеризуется двумя ненулевыми проекциями – перпендикулярно и вдоль направления распространения:

$$E_1 = \mathrm{i}\frac{0.125}{\pi}(k_0\omega_0)^2\int_0^{\pi/2} d\,\theta\sin(2\theta)J_0[y_1]\exp[-\mathrm{i}k_0x_3\cos\theta]y_2,$$

$$E_3 = \frac{0.25}{\pi}(k_0\omega_0)^2\frac{x_1}{r}\int_0^{\pi/2} d\,\theta\sin^2(\theta)J_1[y_1]\exp[-ik_0x_3\cos\theta]y_2,$$

$$H_1 = 0.25i\,\frac{(k_0\omega_0)^2}{\pi}\frac{x_1x_2}{r^2}\int_0^{\pi/2} d\,\theta\sin^3(\theta)J_2[y_1]\exp[-ik_0x_3\cos\theta]y_2,$$

$$H_2 = 0.125i\,\frac{(k_0\omega_0)^2}{\pi}\int_0^{\pi/2} d\,\theta\sin(\theta)\exp[-ik_0x_3\cos\theta]zy_2,$$

$$H_3 = -0.25\,\frac{(k_0\omega_0)^2}{\pi}\frac{x_2}{r}\int_0^{\pi/2} d\,\theta\sin^2(\theta)\cos(\theta)J_1[y_1]\exp[-ik_0x_3\cos\theta]y_2.$$

Где:

$$r = \sqrt{x_1^2+x_2^2}, y_1 = k_0 r\sin\theta,$$

$$y_2 = F1[1,1,-(k_0\omega_0\sin\theta)^2],$$

$$z = (1+\cos^2\theta)J_0[y_1] + \frac{x_2^2-x_1^2}{r^2}\sin^2(\theta)J_2[y_1].$$

Граничное условие задано в плоскости x_1x_2 в виде гауссова пучка с плоским волновым фронтом. Сравнение профилей распределения интенсивности скалярного, псевдовекторного и векторного пучков выполнено методами тензоров структуры на основе первых и вторых пространственных производных [3, 4]. Обсуждаются результаты анализа векторных характеристик волнового пучка, таких как модуль орбитального момента и проекция поляризационного момента импульса, законы сохранения момента импульса, поляризационно-орбитальное взаимодействие для векторного пучка.

Список литературы

1. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.

2. Shugaev F.V., Nikolaeva O.A., Suhareva N.A. Properties of the electromagnetic field of a non-paraxial Gaussian beam propagating through homogeneous and inhomogeneous air // Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems II. – International Society for Optics and Photonics, 2019. V. 11153. P. 111530E.

3. Blank A.V., Babanin E.A., Nasonov A.A. et. al. Profile management of astigmatic energycarrying collimated beam // Proceedings of SPIE. 2019.

4. Jahne B. Digital image processing. Berlin: Springer, 2005.

УДК 535(06)+004(06)

Н.С. БАЛБЕКИН[1], М.С. КУЛЯ[1], Б.В. СОКОЛЕНКО[2],
А.А. ГОРОДЕЦКИЙ[1,3], Н.В. ПЕТРОВ[1]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*
[3]*Университет Бирмингема, Великобритания*

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАВНО ТОПОЛОГИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ТГц ПУЧКОВ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Исследованы оптические свойства широкополосных пучков импульсного терагерцового (ТГц) излучения, обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ) при распространении в турбулентной среде. Проведены численные исследования процесса распространения пучков импульсного ТГц излучения с ОУМ, и определены оптимальные параметры таких пучков, которые, с одной стороны, позволяют максимально использовать ширину спектрального канала, а с другой стороны, обеспечивать требуемую помехоустойчивость для физического сохранения беспроводного канала.

N.S. BALBEKIN[1], M.S. KULYA[1], B.V. SOKOLENKO[2],
A.A. GORODETSKY[1,3], N.V. PETROV[1]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*
[3]*University of Birmingham, United Kingdom*

DIFFRACTION EVOLUTION OF ULTRABROADBAND EQUAL-TOPOLOGICALLY CHARGED THZ BEAMS FOR WIRELESS DATA TRANSMISSION

The optical properties of broadband beams of pulsed terahertz (THz) radiation with orbital angular momentum (OAM) during propagation in a turbulent medium are studied. Numerical studies of the propagation of pulsed THz beams with OAM have been carried out, and the optimal parameters of such beams have been determined, which, on the one hand, allow the maximum use of the width of the spectral channel, and on the other hand, provide the required noise immunity for the physical preservation of the wireless channel.

Постоянно растущая потребность в технологиях и высокоскоростных средствах телекоммуникации вызвана увеличением объемов передаваемых данных. Чтобы поднять пропускную способность

беспроводных каналов связи необходим переход в более высокочастотную область спектра. Дальнейшее увеличение несущей частоты и ширины выделенной полосы радиофизическими методами затруднено и поэтому для развития систем беспроводной связи целесообразно использовать импульсное излучение терагерцового (ТГц) диапазона, которое создается оптическими методами, и обладает широкой спектральной полосой. Использование широкополосных пучков импульсного ТГц излучения, обладающие орбитальным угловым моментом (ОУМ), также дает ряд преимуществ. Такие пучки позволяют осуществлять мультиплексирование каналов связи, а их свойство самовосстановления после столкновения с непрозрачными преградами обеспечивают способность сохранять свою топологию [1].

Мы исследуем динамику распространения в турбулентной среде пучков двух типов: равно топологически заряженных ТГц пучков с зарядом $l = 1$ [1] и $l = 2$ [2]. Рис. 1 демонстрирует устойчивость фазовых свойств пучков, распространенных через турбулентную среду, при том что амплитуда пучка ослабляется под действием поглощения среды распространения.

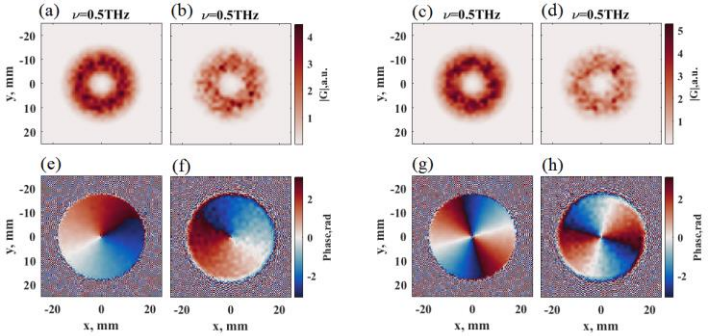


Рис. 1. Амплитудно-фазовые профили ТГц вихревого пучка с цельным зарядом 1 (слева) и 2 (справа)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (19-72-10147).

Список литературы

1. Kulya M. et. al. Spatio-temporal and spatiospectral metrology of terahertz broadband uniformly topologically charged vortex beams // Applied Optics. 2019. V. 58. №. 5. P. A90-A100.

2. Gecevicius M. et. al. Toward the generation of broadband optical vortices: extending the spectral range of a q-plate by polarization-selective filtering //JOSA B. 2018. V. 35. № 1. P. 190-196.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. БАЛАН, В.В. ИВАНОВ, А.В. КУЗОВКОВ, Е.Л. ХАРЧЕНКО
Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград

РАСЧЕТ ФОРМ ОСВЕТИТЕЛЯ ДЛЯ ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИИ УРОВНЯ 65 нм

Рассматриваются методы управления формой некогерентного источника излучения в современной проекционной фотолитографии. Приводятся результаты моделирования литографического изображения для различных форм источника («Диск», «Кольцо», «Квазар») в части влияния его параметров на окно процесса для слоев контактов и переходных отверстий в технологии проектных норм 65 нм. Определены оптимальные параметры для каждой из рассматриваемых форм.

N.N. BALAN, V.V. IVANOV, A.V. KUZOVKOV,
E.L. KHARCHENKO
Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd

CALCULATION OF ILLUMINATION SOURCE SHAPES FOR LITHOGRAPHY PROCESSES AT THE 65 nm NODE

Incoherent illumination source shape control methods in modern projection photolithography are considered. The results of the lithographic image simulation for various source shapes (Conventional, Annular and Quasar) are presented regarding the influence of its parameters on the process window of contacts and vias at the 65 nm technology node. The optimal parameters for each of the considered forms are determined.

Как известно [1], фотошаблон, содержащий некоторый периодический рисунок, при освещении нормально падающей плоской ТЕ-волной длины λ (осевое точечное освещение) формирует дифракционную картину дискретных порядков, отстоящих друг от друга в плоскости пространственных частот на расстояние, обратно пропорциональное периоду элементов рисунка. По причине ограниченности апертуры объектива происходит отсечка пространственных частот высших порядков, что ухудшает качество воспроизводимого изображения или же приводит к полному его отсутствию. Внеосевое освещение [2] перестраивает дифракционную картину, обеспечивая попадание в объектив наибольшего количества гармоник изображения, несущих полезный сигнал. Таким образом, оптимизация параметров формы протяженного осветителя, состоящего из множества взаимно-

некогерентных внеосевых источников излучения, позволяет достичь удовлетворительной проработки в резисте ряда используемых в топологии изделия периодических паттернов, имеющих в частности размер полупериода менее длины волны используемого излучения.

Цель работы состоит в нахождении оптимальных числовой апертуры проекционного объектива и параметров формы протяженного осветителя при литографии контактов и переходных отверстий в технологии производства СБИС проектных норм 65 нм.

Для приведенных на рис. 1 вариантов осветителя были рассчитаны конфигурации фоторезистивной маски контактных окон и переходных отверстий при варьировании формы осветителя и числовой апертуры объектива литографической установки с целью нахождения параметров, обеспечивающих максимальное значение глубины фокуса при 10% разбросе дозы экспонирования. На рис. 2 изображена оптимальная конфигурация осветителя типа «Квазар», обеспечивающая при NA = 0,75 глубину фокуса ΔF = 235 нм, приемлемую для рассматриваемого технологического процесса.

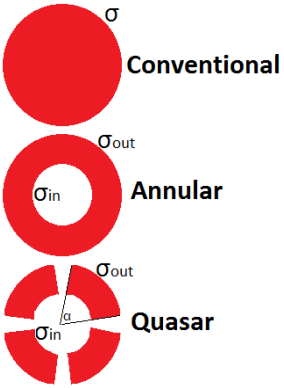


Рис. 1. Варианты используемых параметрических осветителей

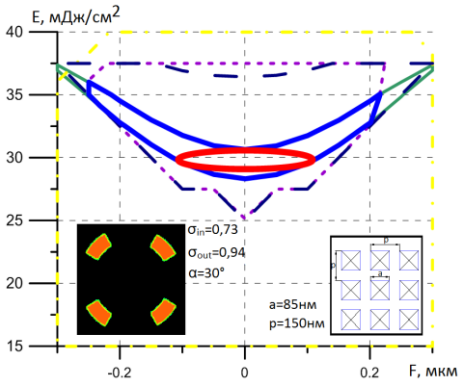


Рис. 2. Окно процесса для контактов и переходных отверстий, NA = 0,75

Список литературы

1. Mack C.A. Fundamental principles of optical lithography: The science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.

2. Красников Г.Я., Синюков Д.В. Проблемы и перспективы развития методов коррекции оптической близости для современных уровней технологии // Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания». 2019. Т. 1(3). С. 17-22.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ШИШОВА, С.Б. ОДИНОКОВ, А.Ю. ЖЕРДЕВ,
М.С. КОВАЛЕВ, Д.С. ЛУШНИКОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

КОРРЕКТИРОВКА ФАЗОВОГО ДИСБАЛАНСА В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В интерференционных датчиках линейных перемещений точная информация о положении считывающей головки вычисляется на основе пары квадратурных (синусоидального и косинусоидального) сигналов. Квадратурная модуляция создается оптически с помощью попускающей дифракционной решетки внутри считывающей головки. В данной работе представлены результаты анализа оптической системы, в которой исследуемая дифракционная решетка располагается в считывающей головке и регламентирует фазовый сдвиг.

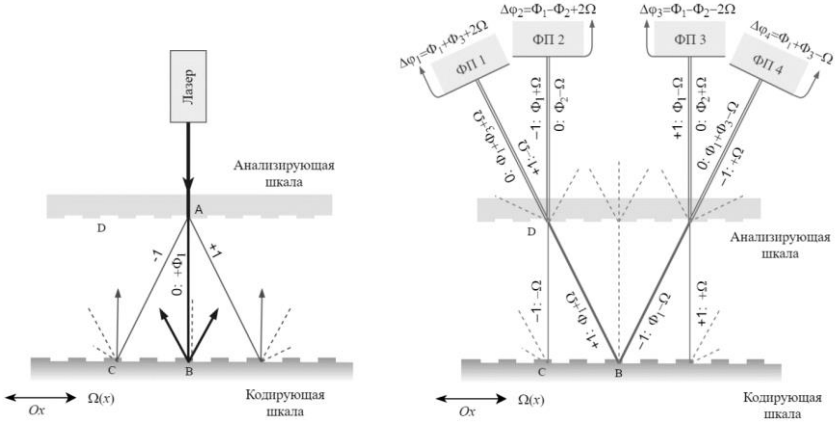
M.V. SHISHOVA, S.B. ODINOKOV, A.Yu. ZHERDEV,
M.S. KOVALEV, D.S. LUSHNIKOV
Bauman Moscow State Technical University

CORRECTION OF THE PHASE IMBALANCE IN THE INTERFERENCE LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

In interference linear encoders, accurate information about the read head position is calculated with help of quadrature pair of signals (sine and cosine) signals. Quadrature modulation is created optically including the transmission diffraction grating into the read head. This paper presents the analysis of optical system in double grating linear displacement sensor where the diffraction grating under study regulates the phase shift.

Датчики линейных перемещений с помощью неподвижной считывающей головки позволяют определять текущую координату и направление смещения объекта, на котором расположена измерительная шкала [1]. В данной работе теоретически и экспериментально анализируется распространённая схема гомодинного интерферометра с двумя дифракционными решетками, показанная на рис. 1. Рассматривается задача минимизации в оптической системе фазового дисбаланса, который в датчике линейных перемещений связан с несоответствием формы сигналов идеальной паре синусоидальной и косинусоидальной функциям. То есть разность фаз между этими сигналами не равна $\pi/2$, что требует корректировки в реальном времени, в

основном электронным методом в присутствии допустимой величины [2]. Кроме отклонения фазового сдвига от идеального значения, к искажениям формы данных сигналов относят неравенство их амплитуд и смещение нулевых уровней сигналов и отклонение фазового сдвига от идеального значения. Для корректного создания квадратурной модуляции в датчике линейных перемещений необходимо проводить контроль фазы оптических компонентов и контроль усиления приемников. Для оценки фазового дисбаланса была использована эллиптическая поправка Хайдемана [3].



а *б*

Рис. 1. Ход лучей в оптической схеме: при распространении излучения от источника до измерительной шкалы (*а*), при распространении излучения в системе после дифракции на измерительной шкале (*б*)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-00304).

Список литературы

1. Hu P., Chang D., Tan J. et. al. Displacement measuring grating interferometer: a review // Frontiers In Technol. Electronic Eng. 2019. V. 20(5). P. 631-654.

2. Hori Y., Gonda S., Bitou Y., Watanabe A., Nakamura K. Periodic error evaluation system for linear encoders using homodyne laser interferometer with 10 picometer uncertainty // Prec. Eng. 2018. V. 12(4). P. 388-392.

3. Heydemann P.L.M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers // Applied Optics. 1981. V. 20(19). P. 3382-3384.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. КОМОЦКИЙ, Н.В. СУЕТИН, А.В. МЕШАЛКИН
Российский университет дружбы народов, Москва

МАКЕТ СЕЙСМОМЕТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ФАЗОВОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Разработана и испытана схема прибора, предназначенного для измерения колебаний земной поверхности. Блок датчика колебаний построен на основе уголкового отражателя и глубокой фазовой дифракционной решетки с прямоугольным профилем. В статье приведена схема устройства, описан принцип его работы.

V.A. KOMOTSKII, N.V. SUETIN, A.V. MESHALKIN
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

MODEL OF SEISMOMETER WITH A SENSOR BASED ON A DEEP REFLECTIVE DIFFRACTION GRATING

The new type of the device for measuring seismics is developed and tested. The vibration sensor unit is built on the base of a corner reflector and a deep phase diffraction grating with a rectangular profile. The article shows the scheme of the device, describes the principle of its operation.

Предложенный прибор вырабатывает сигнал, пропорциональный наклону физического маятника (рис. 1). На неподвижной платформе 1 закреплен физический маятник 6. Чувствительным элементом устройства является блок уголкового отражателя (БУО) 5. На одной из плоскостей БУО расположена глубокая рельефная отражающая дифракционная решётка (ДР) 3, имеющая высокий коэффициент отражения. Глубина рельефа ДР $h_{ДР}$ составляет порядка нескольких длин волн лазера 2. На второй плоскости уголкового отражателя закреплено зеркало 4 с высоким коэффициентом отражения. БУО закреплён на физическом маятнике, при этом ось вращения маятника проходит через зону падения излучения на ДР. Излучение от лазера 2 падает на БУО, после чего распадается на дифракционные порядки. При помощи вспомогательного зеркала 7 излучение направляется к фотодетектору 9. На пути пучка установлена диафрагма 8 для поглощения высших дифракционных порядков. Для устранения свободных колебаний в схему установлен магнитный демпфер 10. За счет БУО при изменении угла падения на ДР, направление

выходного пучка не изменяется. На схему получен патент на полезную модель [1].

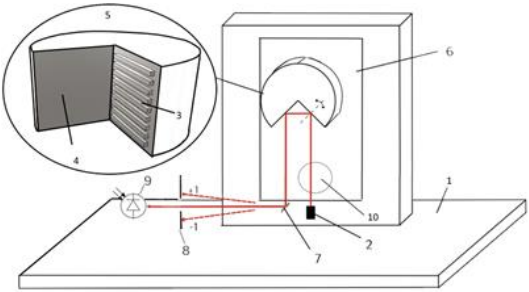


Рис. 1. Схема сейсмометра с глубокой ДР и БУО

График зависимости $P_0(\Theta)$ для ДР с глубиной $h_{ДР} = 1.24\lambda$ приведен на рис. 2. Зависимость имеет осциллирующий характер, мощность изменяется от нуля до $P_{ЭФФ}$. На каждом монотонном участке зависимости можно выделить линейный участок, где изменение мощности пропорционально изменению угла. Если начальный угол падения излучения соответствует середине линейного участка, то в некотором диапазоне колебания мощности в нулевом порядке дифракции пропорциональны колебаниям физического маятника. Регистрируя изменения мощности фотодетектором, мы можем регистрировать колебания маятника, в том числе вызванные сейсмической активностью. В большем диапазоне углов зависимость теряет линейность. Для БУО начальный угол падения следует выбирать близким к 45 º. Методика расчета глубин ДР, соответствующих этому условию приведена в [2].

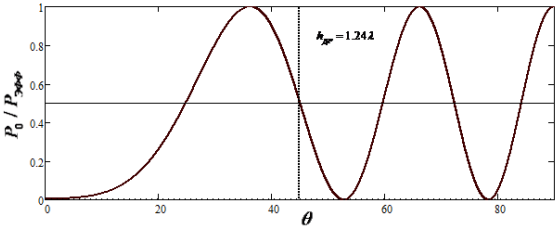


Рис. 2. График зависимости интенсивности
в нулевом порядке дифракции от угла падения

Список литературы

1. Комоцкий В.А., Суетин Н.В. Устройство для определения колебаний земной поверхности. Патент RU191766U1.

2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Суетин Н.В // Радиотехника и электроника. 2017. № 7 (62). С. 717-722.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Г. ДЕНИСОВ, Ю.О. ПРОСОВСКИЙ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ПОДЛОЖКИ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены методы анализа рассеянного излучения. Отработана методика проведения измерения индикатрис светорассеяния на установке Horos. Были исследованы индикатрисы рассеяния подложек, с покрытиями, нанесенными различными методами и различными материалами. Проведен анализ нанесенных покрытий, в результате чего был установлен наиболее оптимальный материал и способ нанесения покрытия.

D.G. DENISOV, Yu.O. PROSOVSKY
Bauman Moscow State Technical University

ASSESSMENT OF QUALITY OF APPLICATION TECHNOLOGY COATINGS FOR SUBSTRATES WITH DIFFERENT LEVEL OF ROUGHNESS BASED ON ANALYSIS FOR THE INDICATRIX OF SCATTERED RADIATION

The methods of analysis of scattered radiation are considered. The methodology for measuring the light scattering indicatrixes at the Horos installation was developed. The scattering indicatrixes of the substrates with coatings deposited by various methods and various materials were investigated. An analysis of the applied coatings was carried out, as a result of which the most optimal material and method of coating were established.

В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на [1-4]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), модификации метода определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS – Angle-Resolved Scattering).

Одним из методов измерения шероховатости сверх гладких поверхностей, высота микронеровностей которых составляет менее 1 нм, является метод дифференциального рассеяния (angle-resolved scattering).

В данной работе с целью оценки качества разработанной технологии нанесения и метода контроля тонкоплёночным оптических покрытий были проанализированны характеристики индикатрисы рассеяния лазерного излучения от образцов с различными оптическими покрытиями, нанесёнными на подложки с различной степенью шероховатости, используя полученную функциональную связь двунаправленной функцией рассеяния индикатрисы лазерного излучения с параметром шероховатости. Измерения были проведенным на производственной площадке НПО им. Лавочкина на установке «Horos».

В результате проведенных исследований были сделаны практически значимые для дальнейшего внедрения современной технологической установки в оптическую промышленность выводы.

Список литературы

1. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н. Измерение шероховатости прецизионных кварцевых подложек и лазерных зеркал методом дифференциального рассеяния // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 71-75.

2. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н. Теория дифференциального и интегрального рассеяния лазерного излучения прецизионной поверхностью диэлектрика // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 4. С. 360-364.

3. Беннет Д.М., Мэтсон Л. Шероховатость поверхности и рассеяние // Оптическое общество Америки. Вашингтон.

4. Лысенко С.И., Снопок Б.А., Стерлигов В.А., Ширшов Ю.М. Статистические свойства поверхностей: особенности расчета автоковариационной функции из индикатрисы рассеянного света // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 91. № 5. С. 852-861.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ПУТИЛИН[1], А.В. МОРОЗОВ[1,2], В.В. ДРУЖИН[3],
С.С. КОПЁНКИН[1], Ю.П. БОРОДИН[1], П.И. МАЛИНИНА[2],
С.Е. ДУБЫНИН[2], А.С. ПЕРЕВОЗНИКОВА[1,3], К.И. ЛЬВОВА[3]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Исследовательский центр «Самсунг», Москва*
[3]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ОПТИКА ДЛЯ ДИСПЛЕЕВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ (HUD и HMD)

Приведены сравнительные характеристики схем построения голографических дисплеев дополненной реальности, а именно виды голографических оптических элементов использующихся в различных функциональных узлах HMD и HUD дисплеев. Приведены результаты записи волноводных голографических перископических схем мультипликации зрачка оптической системы и широкоапертурных голографических линз для изображающих бим-комбайнеров дисплеев дополненной реальности.

A.N. PUTILIN[1], A.V. MOROZOV[1,2], V.V. DRUZHIN[3],
S.S. KOPENKIN[1], Yu.P. BORODIN[1], P.I. MALININA[2],
S.Ye. DUBYNIN[2], A.S. PEREVOZNIKOVA[1,3], K.I. L'VOVA[3]
[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Samsung Research Center, Moscow*
[2]*Bauman Moscow State Technical University*

HOLOGRAM OPTICS FOR HEAD-MOUNTED AND HEAD-UP DISPLAYS

Comparative characteristics of the holographic augmented reality display optical schemes have been discussed, namely the types of holographic optical elements used in various functional units of HMD and HUD displays. The results of waveguide holographic periscopic pupil multiplication holograms and wide-aperture holographic lenses recording for imaging beam-combiners of augmented reality displays are presented.

Виртуализация пространства, окружающего современного человека, идет быстрыми темпами, поскольку цифровые технологии занимают все больший сектор информационного потока. Оптический канал информации самый емкий для человеческого восприятия, соответственно создание

виртуальных (VR), а более правильно, дисплеев дополненной (augmented reality – AR) реальности становится очень актуальной задачей.

По способу взаимодействия со зрителем AR дисплеи можно разделить на два больших класса: Head-up (HUD) дисплеи или дисплеи перед зрителем (жестко связаны с устройством, используемым человеком – машина, самолет и пр.) и Head-mounted (HMD) дисплеи или «носимые на голове» дисплеи (связанные достаточно гибко со зрительным аппаратом человека). Характерные параметры оптических схем таких дисплеев приведены на рис. 1. В оптических схемах AR дисплеев голографические оптические элементы используются достаточно широко в качестве устройств совмещения световых потоков – бим-комбайнеров (beam-combiners), осветителей, изображающих линз, селективных фильтров [1].

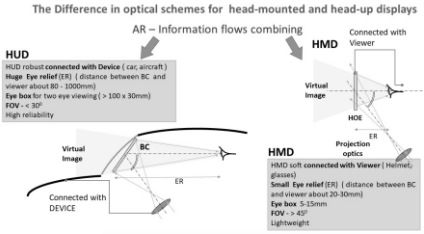


Рис. 1. Оптические схемы HUD и HMD дисплеев

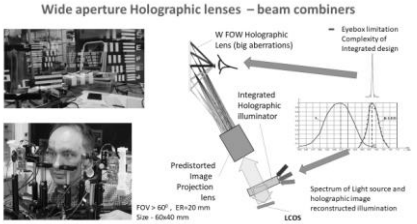


Рис. 2. Оптические схемы AR дисплеев

В этой работе основное внимание уделено появлению принципиально новых свойств оптических схем AR дисплеев при применении различных видов голограмм. Например, запись широкоапертурных голографических линз, использованных в качестве бим-комбайнера позволило создать достаточно простой широкоапертурный – до 90 ^{0} AR дисплей [2] (рис .2). А использование самосогласованной схемы работы волноводного голографического перископа [3] позволяет компенсировать огромные хроматические аберрации волноводных голограмм в углах построения виртуального изображения до 50 ^{0}, для светодиодной RGB подсветки.

Список литературы

1. Kim N. et. al. // in Holographic Materials and Optical Systems /ed. by Naydenova. Intechopen, 2017.
2. Shin B. et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10944. P. 109440G.
3. Putilin A., Gustomiasov I. // Proc.SPIE. 2007. V. 6637. P. 66370N.

УДК 535(06)+004(06)

Ч.Б. КАЙТУКОВ, В.А. КИСЕЛЕВ, А.В. ЯНОВСКИЙ
Научно-технический центр «Атлас», Москва

БЕЗЛИНЗОВАЯ ЗАПИСЬ РАДУЖНОЙ ГОЛОГРАММЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Рассмотрена возможность использования преобразования Фурье для формирования изображений при записи радужных голограмм.

Ch.B. KAYTUKOV, V.A. KISELEV, A.V. YANOVSKY
Scientific and Technical Centre «Atlas», Moscow

LENSLESS RAINBOW HOLOGRAM RECORDING USING FOURIER TRANSFORM

The possibility of using the Fourier transform for image formation when recording rainbow holograms is considered.

Запись радужных голограмм на сегодняшний день осуществляется на дорогостоящем оборудовании специалистами с высокой квалификацией. Эта ситуация оправдана, если речь идёт о защитных голограммах, но в случае имиджевых голограмм, когда предъявляемые требования к разрешению и наличию сложных защитных признаков низки, можно использовать полный спектр возможностей. В представленной работе предпринимается попытка создания устройства для записи радужных голограмм, совмещающего в себе технологии «Дот-матрикс» и «Имидж-матрикс», использующего упрощённую оптическую схему записи.

Следует отметить, что мы пользуемся термином голограмма, но в действительности, упомянутые выше устройства не регистрируют волновой фронт объектов, и в соответствии с принятой терминологией и определениями не производят запись голограмм [1]. Термин голограмма закрепился за продуктами этих устройств исторически, только из-за внешнего сходства с истинными голограммами.

Дот-матрикс и Имидж-матрикс формируют на поверхности дифракционные решётки, обычно фазовые. Дот-матрикс составляет изображение из пикселей диаметром 20 ÷ 50 мкм, по одному за один акт экспозиции. Каждый такой пиксель содержит в себе только одну дифракционную решётку, которая характеризуется периодом и углом

поворота в плоскости голограммы. Имидж-матрикс формирует на жидкокристаллической (ЖК) матрице изображение участка голограммы и с уменьшением до ≈ 200 x 350 мкм за один акт экспозиции записывает его на поверхность. Далее голограмма автоматически передвигается в соседнюю позицию и производится запись следующего участка. Изображение в пределах одного тайла (кадра) может состоять из произвольных по форме участков заполненных разными дифракционными решётками.

Дороговизна самих устройств и их эксплуатации обусловлена сложностью оптических схем и использованием точной механики. Принимая во внимание невысокие требования, представляется возможным использовать схему, представляющую собой что то среднее между уже существующими, а именно: использовать механический поворот вокруг оптической оси для выбора угла дифракционных решёток как в дот-матриксе, а изображение проецировать с помощью ЖК-дисплея как в имидж-матриксе, с той существенной разницей, что на дисплей будут выводиться не сами изображения, а фурье-образы изображений с последующим их восстановлением в когерентном свете.

Подготавливая запись радужной голограммы, предлагается в графическом редакторе выделять из общего дизайна области одинакового цвета и сохранять их как отдельные изображения. Впоследствии на голограмме такие области будут представлены единой дифракционной решёткой. Из подготовленных изображений, используя алгоритм Герчберга-Секстона [2], рассчитываются фурье-голограммы. При записи радужной голограммы, результаты этого расчёта поочерёдно выводятся на ЖК дисплей, который освещается когерентным светом. Происходит восстановление закодированного рисунка, тогда расходящаяся проекция изображения транслируется на плоскость радужной голограммы. Подсвечивая изображение опорным пучком, в выбранных областях будут создаваться дифракционные решётки. Далее циклы повторяются для всего набора дифракционных решёток содержащихся в дизайне радужной голограммы.

Для формирования различных дифракционных решёток с требуемыми параметрами схема предусматривает возможность изменения угла между предметным и опорным пучками, что даёт возможность изменять период. ЖК матрица и голографическая пластинка (рис. 1) жёстко закреплены между собой и имеют возможность вращаться вокруг оптической оси. Таким образом, изменяются углы поворота дифракционных решёток в плоскости голограммы.

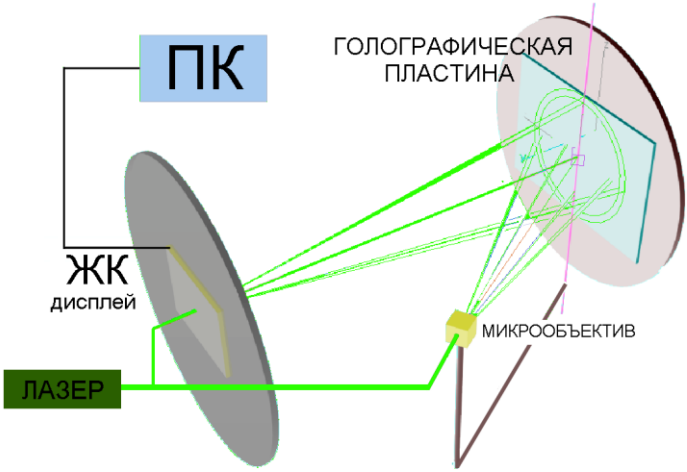


Рис. 1. Оптическая схема

Предлагаемая оптическая схема не позволит выпускать голограммы высокого качества из-за шумов, возникающих при восстановлении фурье-образов с ЖК матрицы. Так же не стоит ожидать высокого разрешения получаемого изображения, так как размер пикселя ЖК матрицы, приблизительно 10 мкм, не позволяет сделать схему достаточно короткой из-за малых углов расходимости восстановленного изображения, а с увеличением расстояния будет падать качество дискретизации результирующей картины.

Данная схема имеет значительное преимущество в том, что совершенно не требует точности фокусировки ввиду отсутствия фокусирующей оптики. Возможность управления распределением пришедшего на матрицу света позволяет устанавливать баланс интенсивностей между предметным и опорным пучками. Простота как самой установки, так и её эксплуатации, может позволить выпустить «голографический принтер» для широкого круга потребителей.

Список литературы

1. Оптическая голография /под ред. Г. Колфилда. М. : Мир, 1982. Т .1.

2. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a comparison // Applied Optics. 1982. V. 21. No. 15. P. 2758-2769.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ПАВЛОВ, И.Э. ВОЛЬФ, И.Э. КУСКОВ, А.Р. СТЕПАНОВ
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОСТЕКЛЕНИЯ КАБИН САМОЛЕТОВ ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

Рассматриваются результаты натурных испытаний устройства неразрушающего контроля элементов остекления, принцип действия которого основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения. Установлена связь между параметрами, регистрируемыми спекл-картинами и параметрами поверхностных дефектов типа «серебро», позволяющих в дальнейшем разработать методику дефектоскопического контроля элементов остекления кабин воздушных судов.

P.V. PAVLOV, I.E. WOLF, I.E. KUSKOV, A.R. STEPANOV
Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A Gagarin, Voronezh

NON-DESTRUCTIVE GLASS CONTROL OF AIRCRAFT CABINS BY ANALYSIS OF PARAMETERS SPECKLE-PHOTO

The results of full-scale testing of a device for non-destructive testing of glazing elements are examined, the principle of which is based on the use of the speckle-structure method of optical radiation. A relationship has been established between the parameters recorded by speckle patterns and the parameters of surface defects of the “silver” type, which make it possible to further develop a method for defectoscopic inspection of glazing elements of aircraft cockpits.

Дефектоскопический контроль остекления кабины воздушного судна - важный этап в обеспечении безопасности полетов.

В работах сотрудников ВИАМ и НИЦ (г. Люберцы) ЦНИИ ВВС МО РФ [1, 2] установлены основные причины снижения прочности элементов остекления от возникновения на поверхности стекла «серебра», что позволило снять ряд вопросов по продлению календарных сроков службы деталей остекления кабин самолетов. Установлена критическая глубина деструктивного слоя, поверхностей остекления из органического слоя при которой достигается наименьшая прочность [3, 4], а так же разработаны методики и способы ремонта и продления ресурса авиационного остекления. Однако, инструменты дефектоскопического контроля авиационного остекления, которые применяются в строевых частях ВКС

МО РФ, не позволяют с высокой достоверность оценить глубину очагов дефектов типа «серебро» и тем самым установить и спрогнозировать предотказное состояние.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники, позволило сотрудникам кафедры 91 электрооборудования (и оптико-электронных систем) ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж), разработать макет экспериментального портативного спекл-лазерного дефектоскопа, который позволяет осуществлять операции по дефектоскопическому контролю авиационных деталей, выполненных из непрозрачных, полупрозрачных и композитных материалов в полевых условиях [5]. Для настройки разработанного устройства в рамках научно-исследовательской работы: «Разработка методического и программного обеспечения для выполнения операций по дефектоскопическому контролю остекления кабин воздушных судов с применение метода спекл-структур оптического излучения» подготовлены тестовые образцы органического стекла, прошедших климатические испытания на воздействие солнечного излучения и агрессивной среды. От полученных образцов зарегистрированы спекл-картины, определены их параметры, что позволило установить зависимость между параметрами спекл-картин и размерами дефектов типа «серебро», позволяющих в дальнейших исследованиях разработать методику дефектоскопического контроля элементов остекления по анализу параметров регистрируемых спекл-картин.

Список литературы

1. Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Сентюрин Е.Г., Попов А.А. Особенности влияния атмосферных факторов на авиационные органические стекла // Труды ВИАМ. 2018. № 11.

2. Балашов А.А., Акользин С.В., Комаров В.Г. Ускоренные испытания деталей остекления из фтороорганического стекла воздушных судов в условиях субтропического и жаркого тропического климата // Сб. научных статей Всероссийской НПК «Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях». Люберцы, 2016. С. 241-245.

3. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Орлова И.В. Полирование и шлифование – эффективные методы повышения «серебростойкости» и оптических характеристик оргстекол при изготовлении и продлении ресурса авиационного остекления в эксплуатации (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10.

4. Акользин С.В., Фролков А.И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления при ремонте и в эксплуатации // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 41-44.

5. Павлов П.В., Вольф И.Э., Москвин Н.В. Применение метода спекл-структур оптического излучения в задачах неразрушающего контроля // Журнал. Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 6 (6). С. 112-122.

УДК 535(06)+004(06)

П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. КОЗЛОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОЦЕНКА ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ КАМЕР АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИЕЙ ОДНОРОДНЫХ СЦЕН

Для оценки шумовых характеристик цифровых камер разработана методика, позволяющая определить шумы камер по результатам съёмки всего двух сцен. Методика экспериментально апробирована на цифровой камере машинного зрения. Подтверждено, что предложенная методика может быть использована для точного и быстрого определения шумовых характеристик цифровых камер.

P.A. CHEREMKHIN, A.V. KOZLOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIGITAL CAMERAS NOISE CHARACTERISTICS ESTIMATION BY AUTOMATIC SEGMENTATION OF UNIFORM TARGETS

We developed a method that allows to estimate cameras noise by two targets registering. The method was experimentally tested using machine vision digital camera. The method allowed accurate and fast digital cameras noise characteristics estimation.

В настоящее время цифровые фото- и видеокамеры являются неотъемлемыми элементами в самых различных областях науки, например, в криминалистике [1] или цифровой голографии [2]. К числу актуальных задач современной фототехники относится характеризация используемых камер. Под данным термином понимается определение шумовых характеристик камеры [3]: темновой составляющей временного шума (σ_{dt}), нахождение показателей неоднородности световой (photo response non-uniformity, *PRNU*) и темновой (dark signal non-uniformity, *DSNU*) пространственных составляющих шумов, световых временных шумов и коэффициента пересчёта электронов в цифровые единицы (K) [4]. Большинство производителей даже в случае научных камер не указывает значений многих из перечисленных характеристик. Подбирая камеру для той или иной научной задачи необходимо знать её шумовые характеристики, при этом, можно предпринять действия для уменьшения их влияния на изображение посредством компьютерной обработки.

Для характеризации цифровых камер предложена методика, включающая съёмку 1 серии однородных световых (на средних сигналах) и 1 серии темновых (с закрытой крышкой) кадров. В каждой серии должно быть не менее 2 кадров. Темновые составляющие временного и пространственного шумов оцениваются по темновой серии кадров, световой временной шум на средних сигналах получается из световых кадров, затем используя темновую и световую временные составляющие шумов рассчитывается ***K***.

Используя информацию о темновых и временной световой составляющей шума определяется световой пространственный шум. Для верификации методики были проведены эксперименты для камеры машинного зрения PixeLink PL-B781F, как с использованием стандартного метода (EMVA 1288 [3]), так и разработанного метода. Результаты измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерения шумовых параметров стандартным и разработанным методами

Метод	*PRNU*	*DSNU*, цифр.ед.	*K*, эл./цифр.ед.	σ_{dt}, цифр.ед.
EMVA 1288	0,0075±0,0001	0,66±0,02	10,7±0,6	0,35±0,01
Разработанный	0,0075±0,0001	0,66±0,03	10,5±0,4	0,35±0,07

Как видно, результаты совпадают в пределах погрешности измерений. Это указывает на высокий уровень точностных характеристик разработанного метода при существенном (не менее 1 порядка) увеличении скорости измерений.

Список литературы

1. Fridrich J. Digital image forensic using sensor noise // IEEE Signal Process. Mag. 2009. V. 26 (2). P. 26-37.

2. Schnars U., Falldorf C., Watson J., Jüptner W. Digital holography and wavefront sensing: Principles, techniques and applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.

3. European Machine Vision Association, EMVA Standard 1288 Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. Release 3.1. 2016. http://www.emva.org/cms/upload/Standards/.

4. Козлов А.В., Черёмхин П.А. Анализ потенциала оптимизации сенсоров цифровых камер путём варьирования характеристик пикселя // Сборник трудов VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 735-736.

УДК 535(06)+004(06)

А.Т. ТУРОВ[1], М.С. КУЛЯ[1], А.А. ГОРОДЕЦКИЙ[1,2], Н.В. ПЕТРОВ[1]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Университет Бирмингема, Великобритания*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ГОЛОГРАММ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

В работе продемонстрировано исследование зависимостей разрешения и контраста при восстановлении амплитудных и фазовых изображений тестового объекта методами цифровой импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени от частоты и способа изменения телесного угла, под которым видны эти голограммы. Телесные углы изменялись двумя способами: изменением расстояния между плоскостью записи и плоскостью объекта и изменением площади голограммы.

A.T. TUROV[1], M.S. KULYA[1], A.A. GORODETSKY[1,2], N.V. PETROV[1]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*University of Birmingham, United Kingdom*

EVALUATION OF RECONSTRUCTION QUALITY OF TERAHERTZ PULSE TIME-DOMAIN HOLOGRAMS

The work demonstrates the numerical and analytical study of the frequency dependences of reconstruction resolution and contrast in amplitude and phase pulsed terahertz time-domain holography on the hologram solid angle. The method of changing the solid angle at which these holograms are visible. The solid angles were changed in two ways: by changing the distance between the hologram plane and object plane and by changing the area of the hologram.

Несмотря на то что с момента открытия было проведено масштабное исследование терагерцового (ТГц) излучения, наиболее значительный прогресс в этой области начался только в последние три десятилетия. Это обосновано развитием генераторов и приёмников такого излучения а также рядом присущих ему уникальных свойств. Одним из перспективных методов использования ТГц излучения является импульсная терагерцовая голография с разрешением во времени (THz PTDH) [1]. Главным образом, она допускает прямую инверсию волнового фронта и последующее восстановление спектральных свойств амплитудных и фазовых объектов. Однако, её важные свойства, такие как

разрешение, контраст и общие свойства восстановления, не были тщательно изучены. Чтобы сделать это, были взяты амплитудные и фазовые исходные изображения объектов (рис. 1а), соответствующих телесным углам от 0,0375 до 0,16 стерад., изменяемых площадью голограммы или расстоянием распространения. Для этих объектов в программной среде LabView численными методами моделировалась запись и восстановление (рис. 1б) голограммы широкополосным спектром с частотами от 0,3 до 3 ТГц. Оценка контраста производилась по формуле $(A_w - A_b)/(A_w + A_b)$, где A_w – среднее значение интенсивности по областям, которые должны быть белыми, A_b – среднее значения по областям, которые должны быть черными. Полученные результаты представлены на рис. 1в-з.

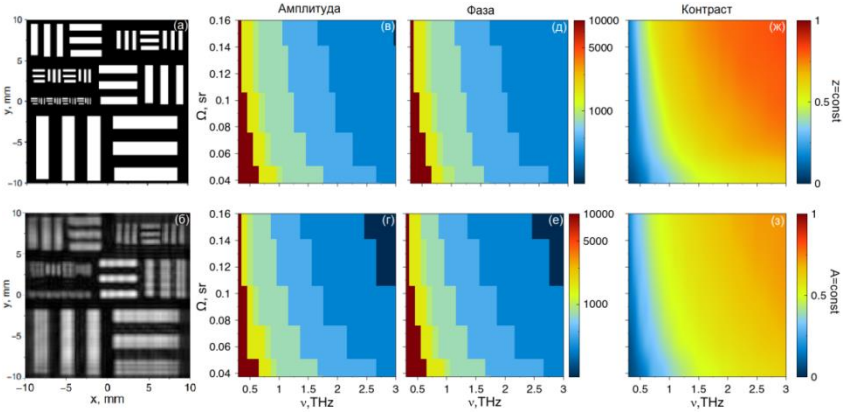


Рис. 1. Исходный (а) и восстановленный (б) объект; разрешение (в, г) и контраст (ж, з) бинарного амплитудного объекта, восстановленного методами THz PTDH при различных телесных углах, изменяемых расстоянием (A = const) или площадью (z = const) голограммы; разрешение (д, е) восстановления бинарного фазового объекта

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (19-72-10147).

Список литературы

1. Petrov N.V., Kulya M.S., Tsypkin A.N., Bespalov V.G., Gorodetsky A.A.. Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging // IEEE transactions on terahertz science and technology. 2016. V. 6. No. 3. P. 464-472.

2. Turov A.T., Kulya M.S., Petrov N.V., Gorodetsky A.A. Resolution and contrast in terahertz pulse time-domain holographic reconstruction // Applied Optics. 2019. V. 58. P. G231-G239.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. КРАСНОВ, И.П. РЯБЦЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

БЕЗЛИНЗОВАЯ СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Предлагается схема оптического кодирования изображений со светодиодным освещением, в которой отсутствуют линзовые фокусирующие элементы. Представлены результаты её экспериментальной реализации на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света.

V.V. KRASNOV, I.P. RYABCEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

THE LENSLESS SCHEME OF OPTICAL ENCRYPTION OF IMAGES WITH LED ILLUMINATION

The lensless scheme of optical encryption of images with LED illumination is presented. Results of experimental implementation on the basis of two liquid crystal spatial light modulators are presented.

В настоящее время широко распространены схемы оптического кодирования, построенные на основе классической 4F-схемы. Недостатками такой схемы являются большие габариты, сложность оптической реализации, а также формирование сфокусированного нулевого порядка дифракции в плоскости фотосенсора.

В работе предлагается безлинзовая схема оптического кодирования изображений, использующая в качестве источников излучения светодиоды. Отказ от линз позволяет сделать схему существенно легче, компактнее, виброустойчивее. Особенностью данной схемы является использование дифракционного оптического элемента (ДОЭ), синтезированного таким образом, чтобы формировать в плоскости фотосенсора требуемую функцию рассеяния точки (ФРТ), являющуюся ключом кодирования, при освещении ДОЭ расходящейся сферической волной. Такой ДОЭ выполняет функцию фокусировки светового пучка, в результате чего потери излучения сведены к минимуму.

Безлинзовая схема оптического кодирования изображений, со светодиодным освещением, построенная на базе двух пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовалась матрица светодиодов (МС) с

центральной длиной волны излучения 655 нм и шириной спектра 20 нм. Использование матрицы светодиодов вместо лазера в качестве источника пространственно-некогерентного освещения позволяет отказаться от элементов, служащих для формирования расходящегося пучка и разрушения пространственной когерентности, что делает схему еще более компактнее и проще в реализации. Для ввода кодируемых изображений использован амплитудный ЖК ПВМС «HoloEye LC2002» (ПВМС1). Для отображения кодирующего ДОЭ использован фазовый ЖК ПВМС «Santec SLM-200» (ПВМС2). Светоделительный куб (СК) установлен таким образом, что на фотосенсоре камеры формируется свертка изображения с ФРТ кодирующего ДОЭ. Декодирование осуществлялось численно с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову. Результаты проведённых экспериментов демонстрируют успешное кодирование и декодирование тестового изображения (рис. 2). Нормированное среднеквадратичное отклонение декодированного изображения от исходного составило 0,20.

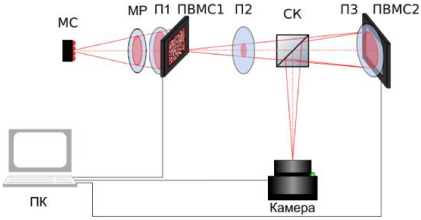
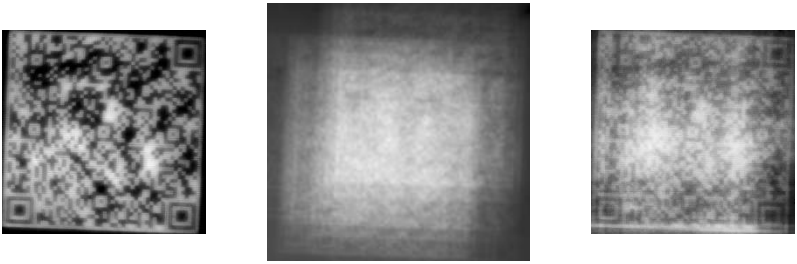


Рис. 1. Безлинзовая схема оптического кодирования изображений со светодиодным освещением



а *б* *в*

Рис. 2. Исходное изображение (*а*), кодированное изображение (*б*), декодированное изображение (*в*)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. ПРОКОПОВА[1,2], К.В. ЕФИМОВА[1,2], С.А. КИШКИН[1],
С.П. КОТОВА[1,2], С.А. САМАГИН[1]
[1]*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*
[2]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва*

ФОРМИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приведены результаты численного моделирования и экспериментов по формированию спиральных пучков света голографическим методом. Рассмотрены случаи различных профилей штриха формируемой голограммы (симметричный и асимметричный).

D.V. PROKOPOVA[1,2], K.V. EFIMOVA[1,2], S.A. KISHKIN[1],
S.P. KOTOVA[1], S.A. SAMAGIN[1]
[1]*Samara Branch of the Lebedev Physical Institute*
[2]*Samara National Research University*

FORMATION OF SPIRAL BEAMS OF LIGHT BY HOLOGRAPHIC METHOD

The results of numerical modeling and experiments on the formation of spiral light beams by the holographic method are presented. Various groove profiles of the formed hologram, symmetric and asymmetric, are considered.

Спиральные пучки света – это световые поля, сохраняющие заданную структуру распределения интенсивности при распространении в пространстве и фокусировке за исключением масштаба и поворота [1-3]. Спиральные пучки света находят свое применение в различных областях. Было найдено аналитическое выражение, позволяющее рассчитать комплексную амплитуду спирального пучка с интенсивностью в виде произвольной плоской кривой, заданной параметрически z(t) [2]. В работе [3] для формирования таких световых полей предложен голографический метод. В [4] предлагается использовать голограммы с асимметричным профилем штриха для формирования оптических вихрей, что приводит к увеличению эффективности по сравнению с использованием классических голограмм с симметричным профилем штриха.

Целью работы является исследование возможностей методов, описанных в [3, 4], для формирования спиральных пучков в форме замкнутой кривой. Расчет фазового профиля голограмм проводится при

помощи разработанного оригинального программного обеспечения. Формируются фазовые голограммы при помощи жидкокристаллического фазового пространственного модулятора света (ЖК ПМС) Holoeye 1080P (глубина модуляции фазы 2π, сторона пикселя – 8 мкм, разрешение 1920 x 1080 пикселей). Схема экспериментальной установки приведена рис. 1. Восстанавливаются голограммы коллимированным пучком твердотельного лазера на длине волны 532 нм. Распределения интенсивности в плоскости Фурье приведены на рис. 2.

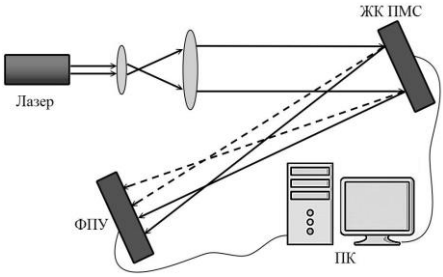


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

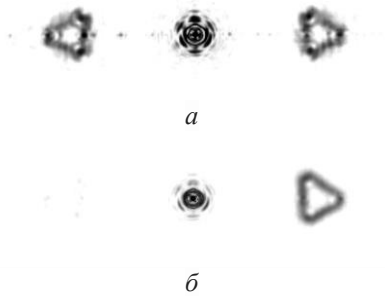


Рис. 2. Распределения интенсивности (негатив) в плоскости Фурье, восстановленные с голограммы с симметричным (*а*) и асимметричным (*б*) профилем штриха

Проведена оценка качества восстанавливаемых с голограммы спиральных пучков. Эффективность преобразования при использовании голограммы с асимметричным профилем штриха выше в ≈ 2,3 раза.

Проведена оценка возможностей метода при формировании рассчитанных голограмм с помощью жидкокристаллического фазового пространственного модулятора света Holoeye 1080P.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90078.

Список литературы

1. Abramochkin E., Volostnikov V. // Optics Communications. 1996. V. 125. № 4. P. 302.

2. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит, 2010.

3. Афанасьев К.Н., Кишкин С.А. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 184.

4. Аксенов В.П., Венедиктов В.Ю. и др. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. №. 2. С. 275.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ,
К.М. ЖУМАЛИЕВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ
Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММ ФАЗОВЫХ СРЕД, УЧИТЫВАЮЩАЯ НАЛИЧИЕ ВТОРОЙ ОПОРНОЙ ВОЛНЫ

Учёт недифрагированной составляющей волны, прошедшей сквозь фазовый объект, дает возможность получить голограмму, сочетающую свойства внеосевой голограммы и голограммы Габора. Такая голограмма обладает рядом свойств, имеющих перспективы практического применения.

Y.K. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV,
K.M. ZHUMALIEV, S.A. ALYMKULOV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

RECORDING HOLOGRAMS OF PHASE MEDIA, TAKING INTO ACCOUNT THE PRESENCE OF A SECOND REFERENCE WAVE

Taking into account the undiffracted component of the wave passing through the phase object makes it possible to obtain a hologram combining the properties of an off-axis hologram and a Gabor hologram. Such a hologram has a number of properties that have prospects for practical application.

При записи голограммы фазового объекта его пропускающий коэффициент и волну, которая проходит сквозь такой объект, можно рассматривать как совокупность двух волн:

$$\sigma(x_0, y_0) = \sigma_0 + \Delta\sigma(x_0, y_0), \tag{1}$$

$$U(x, y) = U_0 + U_1(x, y) = c_0 \exp(-i\alpha_0) + c_1(x, y) \exp[-i\alpha_1(x, y)], \tag{2}$$

здесь σ_0 и $\Delta\sigma$, соответственно, описывают недифрагированную и дифрагированную составляющие коэффициента пропускания; c_0 – амплитуда недифрагированной составляющей волны (когерентный фон), соответствующая σ_0; $c_1(x, y)$ – амплитуда дифрагированной составляющей волны, соответствующая диффузной компоненте $\Delta\sigma(x_0, y_0)$; α_0 и $\alpha_1(x, y)$ – фазы этих волн.

Интенсивность световой волны в плоскости голограммы:

$$I(x,y)=\left|Rexp(-i\lambda)+U_0exp[-i(\alpha_0+\psi)]+U_1exp[-i(\alpha_1+\psi)]\right|^2=R^2+U_0^2+U_1^2+ \\ +2U_0U_1\cos(\alpha_1-\alpha_0)+2RU_1\cos(\psi+\gamma-\alpha_1)+2RU_0\cos(\psi+\gamma-\alpha_0), \quad (3)$$

здесь $\psi=2\pi\beta x$, $\beta=\sin\theta/\lambda$ – пространственная частота, λ – длина волны при записи, R^2 и U_0^2 – интенсивности опорной и недифрагированной составляющей предметной волн, U_1^2 – фотографическое изображение объекта.

При записи распределения интенсивности в соответствии с формулой (3) фиксируются, по сути, три голограммы на один носитель. Слагаемое $2U_0U_1\cos(\alpha_1-\alpha_0)$ – представляет собой голограмму Габора, слагаемое $2RU_1\cos(\psi+\gamma-\alpha_1)$ – описывает внеосевую голограмму Лейта. Последнее слагаемое $2RU_0\cos(\psi+\gamma-\alpha_0)$ формирует изображение решетки, которое представляет собой интерференционную картину в виде системы параллельно расположенных линий, пространственная частота которой равна β. Изображение решетки возникает за счет интерференции опорной волны R и недифрагированной составляющей объектной волны U_0.

Если сравнить выражения для интенсивности волн, полученных при восстановлении голограмм по предложенной схеме и по обычной внеосевой схеме, то можно показать, что введение в схему записи голограммы второй опорной волны, соосной предметной, приводит к возникновению дополнительных компонентов, описывающих новые функциональные свойства рассмотренной голограммы [1-5].

Список литературы

1. Ismanov Y.Kh., Dzhamankyzov N.K. Holographic Interferometer for the study of phase media, which has four output channels of different sensitivity // International Journal of Optics. 2019. V. 2019. P. 2936172.

2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5144- P. 606-610.

3. Исманов Ю.Х., Кулмурзаев Н.М., Тургунбаев Н.А. Регистрирующие среды для голографии и радужная голография // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2014. № 1. С. 83-88.

4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 104-106.

5. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. № 4(40). С. 194-198.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БЕЛАШОВ[1,2], А.А. ЖИХОРЕВА[1], Д.А. ГОРБЕНКО[1,2], Н.А. АВДОНКИНА[3], И.А. БАЛДУЕВА[3], А.Б. ДАНИЛОВА[3], М.Л. ГЕЛЬФОНД[3], Т.Л. НЕХАЕВА[3], И.В. СЕМЕНОВА[1], О.С. ВАСЮТИНСКИЙ[1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[3]*Национальный медицинский исследовательский центр им. Н.Н. Петрова Минздрава России, Санкт-Петербург*

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ФОТОДИНАМИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗЛИЧНЫХ КЛЕТОЧНЫХ КУЛЬТУР

В работе продемонстрирована возможность применения методов цифровой голографической микроскопии для исследования восприимчивости различных культур раковых клеток к воздействию активных форм кислорода. Проведено исследование динамики изменения среднего фазового набега и сухой массы клеток при дозе фотодинамического воздействия равной 30 Дж. Несмотря на то, что при данных условиях, в большинстве случаев, наблюдается некроз культивируемых клеток злокачественных опухолей, некоторые культуры демонстрируют полную резистивность к данному типу воздействия.

A.V. BELASHOV[1,2], A.A. ZHIKHOREVA[1], D.A. GORBENKO[1,2], N.A. AVDONKINA[3], I.A. BALDUEVA[3], A.B. DANILOVA[3], M.L. GELFOND[3], T.L. NEKHAEVA[3], I.V. SEMENOVA[1], O.S. VASYUTINSKII[1]

[1]*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[3]*N.N. Petrov Institute of Oncology, Saint Petersburg*

APPLICATION OF DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY FOR ESTIMATION OF VARIOUS CELL CULTURES RESISTIVITY TO PHOTODYNAMIC TREATMENT

The work demonstrates application of digital holographic microscopy for assessment of various cell types sensitivity to reactive oxygen species. We performed an investigation of average phase shift variation after photodynamic treatment with total dose of 30 J. Although most of cell types demonstrate necrosis, in some cases no response of living cells was observed.

Сегодня фотодинамическая терапия активно используется при лечении многих онкологических заболеваний особенно на ранних стадиях и при локализации злокачественных опухолей в покровных тканях. Успешность лечения онкологических заболеваний существенно зависит от многих факторов, в том числе и типа раковых клеток, а также персональных данных пациента. Одним из методов оценки чувствительности различных типов раковых клеток на фотодинамическое воздействие может быть цифровая голография, которая, как было продемонстрировано ранее [1], позволяет осуществлять неинвазивный мониторинг процесса гибели клеток и оценивать скорость протекания данного процесса.

Данная работа посвящена применению методов цифровой голографической микроскопии для исследования отклика различных типов живых клеток на фотодинамическое воздействие с использованием фотосенсибилизатора Радахлорина. В рамках этого исследования с помощью голографических методов проводился анализ изменения основных оптических и морфологических характеристик клеток in vitro в результате внутриклеточной генерации активных форм кислорода. В ходе эксперимента проводился мониторинг накопления фотосенсибилизатора в живых клетка после их инкубации в растворе питательной среды DMEM и фотосенсибилизатора в течение 2 часов. При анализе динамики изменения фазовых изображений клеток, полученных с помощью голографической микроскопии, основное внимание уделялось анализу изменения среднего фазового набега, внесенного живыми клетками, и изменению их сухой массы в течение полутора часов после фотодинамического воздействия. В результате выполнения работы было показано, что клетки различных типов опухолей, таких как саркома, меланома и рак почки демонстрируют различную реакцию в ответ на фотодинамическое воздействие одной и той же дозы [2]. Кроме того, в ходе проведения экспериментов было установлено, что раковые клетки различных пациентов с одинаковой локализацией злокачественной опухоли могут демонстрировать заметно различающуюся реакцию на фотодинамическое воздействие.

Работа была поддержана стипендией Президента РФ, и выполнена в рамках проекта СП-2349.2019.4.

Список литературы

1. Belashov A.V., et. al. // Biomedical optics express. 2019. V. 10. № 10. P. 4975-4986
2. Zhikhoreva A.A., et. al. // Russian Journal of Physical Chemistry B. V. 13. № 3. P. 394-400

УДК 535(06)+004(06)

П.А. ИВАНОВ
Ярославский государственный технический университет

КВАДРАТИЧНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ В ЗАДАЧАХ РАЗЛИЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, а также межклассовое распознавание с помощью квадратичных корреляционных фильтров.

P.A. IVANOV
Yaroslavl State Technical University

QUADRATIC CORRELATION FILTERS IN PROBLEMS OF IMAGES RECOGNITION

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations and several classes' recognition with the usage of quadratic invariant correlation filters are given.

При корреляционном распознавании изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям (поворот, сдвиг, изменение масштаба, сложное искажение формы), выходной корреляционный пик резко деградирует при самых малейших изменениях геометрии распознаваемого объекта по сравнению с эталоном. Возможны различные варианты выбора эталонных объектов, довольно привлекательным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1]. В данной работе в качестве объекта исследования использовались квадратичные инвариантные корреляционные фильтры (КФ), относящиеся к алгоритмам синтеза, в основу которых закладывается вычисление некоторого инвариантного параметра. Были проведены эксперименты по компьютерному моделированию распознавания изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота и изменению масштаба, а также межклассовому распознаванию изображений.

Рассмотрим алгоритм синтеза фильтра. В основе алгоритма синтеза лежит вычисление двух функционалов:

$$\phi_c = E\left\{\left(\check{\mathbf{x}}^{(c)}\right)^T \mathbf{Q}\check{\mathbf{x}}^{(c)}\right\}. \quad (1)$$

Здесь x – это вектор-изображение класса c (c = 1 для “истинного” класса, c = 2 для “ложного” класса), Q – вычисляемый функционал вида

$$\mathbf{Q} = \sum_{i=1}^{N_1} \check{\mathbf{f}}_i \check{\mathbf{f}}_i^T - \sum_{i=1}^{N_2} \check{\mathbf{b}}_i \check{\mathbf{b}}_i^T. \quad (2)$$

Здесь f и b – это соответственно наибольшие положительные и отрицательные собственные вектора разности двух корреляционных функций вида

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2. \quad (3),$$

где

$$\mathbf{R}_c = E\left\{\check{\mathbf{x}}_i^{(c)}\left(\check{\mathbf{x}}_i^{(c)}\right)^T\right\}. \quad (4)$$

После вычисления функционалов строится фильтр:

$$g(m,n) = \sum_{i=1}^{N_1}\left(\mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{x(m,n)\}\mathcal{F}^*\{f_i(m,n)\}\right\}\right)^2 - \sum_{i=1}^{N_2}\left(\mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{x(m,n)\}\mathcal{F}^*\{b_i(m,n)\}\right\}\right)^2. \quad (5)$$

Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций набора входных изображений с фильтром, нормированные на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции).

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение квадратичных фильтров для подобного класса задач.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Applied Optics. 1992. V. 31. P. 4773-4801,

2. Иванов П.А. Квадратичные и полиномиальные корреляционные фильтры в задачах распознавания изображений на базе оптоэлектронных процессоров. // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017. Вып. 12. С. 219-227.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Е. САВИЧ[1], А.В. ПОПОВА[1], И.А. КРИВОШЕЕВ[1,2],
В.В. КРИШТОП[1]
[1]*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*
[2]*Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН*

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ИНДИКАТРИСА КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Работа посвящена анализу состояния поляризации монохроматического излучения, проходящего через двухступенчатый скрещенный фильтр Шольца. В ходе измерений определялись экспериментальные значения азимутов поляризации и углов эллиптичности поляризованного излучения с целью сравнения их с теоретическими.

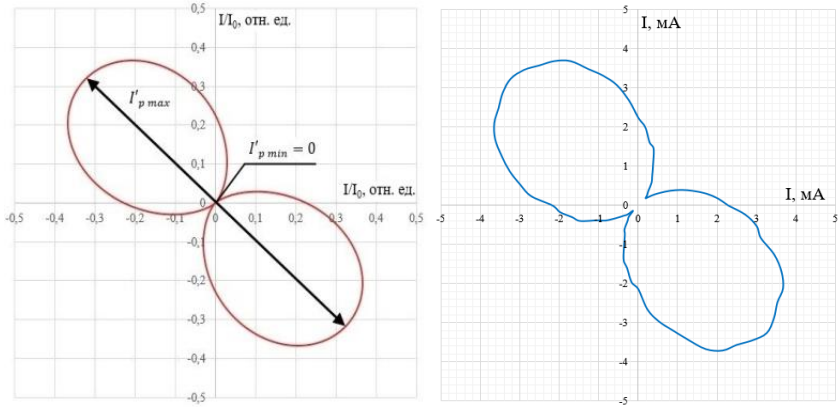
D.E. SAVICH[1], A.V. POPOVA[1], I.A. KRIVOSHEEV[1,2],
V.V. KRISHTOP[1]
[1]*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*
[2]*Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS*

POLARIZATION INDICATRIX AS A METHOD OF INVESTIGATION OF RADIATION POLARIZATION STATE

The work is devoted to the analysis of the polarization state of monochromatic radiation passing through a two-stage crossed Solc-filter. Experimental values of polarization azimuths and ellipticity angles of polarized radiation were determined in order to compare them with theoretical ones.

Поляризационная индикатриса строится в прямоугольной системе координат относительно выбранной оси абсцисс, от которой отсчитывается азимут поляризационного эллипса ψ' и угол θ, фиксирующий ось пропускания поляризатора [1]. В практических опытах при вращении плоскости поляризации поляризатора, расположенного на пути следования исследуемого излучения поляризационная индикатриса будет представлять собой замкнутую фигуру, показывающую зависимость интенсивности на выходе поляризатора от угла поворота его плоскости поляризации [2, 3].

Целью работы является экспериментальное исследование состояния поляризации излучения на выходе интерференционно-поляризационного фильтра Шольца и сравнение полученных значений поляризационных характеристик выходного излучения с теоретическими показателями. На рис. 1 изображены полученные теоретическая и практическая поляризационные индикатрисы.



а *б*

Рис. 1. Теоретическая (*а*) и экспериментальная (*б*) поляризационные индикатрисы

Сравнение индикатрис демонстрирует совпадение угла азимута поляризации. При этом модуль угла элиптичности практической индикатрисы $\chi' = 12.48°$ отличается от идеального теоретического значения $\chi' = 0$. Так же степень поляризации излучения реального излучения $P' = 0.91 \neq 1$. Различие результатов объясняется неидеальностью поляризаторов, используемых в эксперименте.

Список литературы

1. Ищенко Е.Ф. Соколов А.Л. Поляризационная оптика. М.: Физматлит. 2012.

2. Попова А.В., Гончарова П.С., Сидоров Н.В., Палатников М.В., Сюй А.В., Ливашвили А.И., Криштоп В.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 3. С. 285-290.

3. Сюй А.В., Кравцова Н.А., Строганов В.И., Криштоп В.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 10. С. 65-68.

4. Goncharova P.S., Syuy A.V., Krishtop V.V. // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10176. P. 101761G.

УДК 535(06)+004(06)

М.Н. ГАППАРОВА, А.В. ЩУКИН, В.Е. БОДРЕНИН,
Д.К. РОМАНЕНКО, А.С. ПЕРИН
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ШИРИНУ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

В работе получено выражение, позволяющее оценить влияние изменения температуры на ширину лазерного пучка при формировании пироэлектрических пространственных солитонов в кристалле ниобата лития.

M.N. GAPPAROVA, A.V. SCHUKIN, V.E. BODRENIN,
D.K. ROMANENKO, A.S. PERIN
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

INFLUENCE OF TEMPERATURE CHANGE ON THE WIDTH OF A LASER BEAM IN THE FORMATION OF PYROELECTRIC SPATIAL SOLITONS IN A LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

An expression is obtained that allows one to estimate the effect of temperature changes on the laser beam width during the formation of pyroelectric spatial solitons in a lithium niobate crystal.

Пироэлектрические пространственные солитоны [1] могут служить инструментом для формирования волноводно-оптических элементов в кристаллах ниобата лития [2]. Важным параметром, определяющим вклад пироэлектрического эффекта в процесс генерации солитона, является изменение температуры кристалла. Возникающее при нагреве пироэлектрическое поле вносит существенный вклад в распределение поля пространственного заряда в кристалле при его освещении. Целью данной работы является исследование влияния изменения температуры на ширину лазерного пучка при формировании пироэлектрических пространственных солитонов в кристалле ниобата лития.

В случае учета пироэлектрического эффекта величина поля пространственного заряда E_{sc} будет обусловлена вкладом поля E_{phsc} (1), формируемого за счет фоторефрактивного эффекта, и полем E_{pysc} (2), учитывающим пироэлектрический эффект кристалла ниобата лития:

$$E_{phsc} = -E_{ph}\frac{I}{I+I_d}, \quad (1)$$

$$E_{pysc} = E_{py}\frac{\sigma_{ph}}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \approx E_{py}\frac{\sigma \cdot I}{I_d}, \quad (2)$$

где I – интенсивность лазерного пучка, I_d – темновая интенсивность, $E_{ph} = \frac{\beta_{ph}\gamma N_A}{e\mu s}$ – фотовольтаическое поле; $E_{py} = -\frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_r}p\Delta T$ – пироэлектрическое поле, возникающее при изменении температуры; $p = \frac{\partial P_s}{\partial T}$ – пироэлектрический коэффициент, P_s – величина спонтанной поляризации; ΔT – изменение температуры; σ_{ph} – фотопроводимость кристалла; ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме; ε_r – диэлектрическая проницаемость ниобата лития; σ – удельная проводимость образца.

Для описания распространения светового поля через кристалл ниобата лития было использовано выражение:

$$\left(i\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{2k}\cdot\frac{\partial^2}{\partial x^2}\frac{k}{n_e}\Delta n\right)A(x,z) = 0, \quad (3)$$

где A – огибающая светового пучка, Δn – изменение показателя преломления среды; $k=k_0n_e$ – волновой вектор, k_0 – волновое число, n_e – необыкновенный показатель преломления. Изменение показателя преломления определялось как $\Delta n = -\frac{1}{2}n_e^3 rE_{sc}$.

Решая уравнение (3) с учетом (1) в (2), получим:

$$s \pm \int_A^1 \frac{dA}{\left[\beta r A^2(1-A^2) + \frac{2\alpha}{r}(\log(1+rA^2) - A^2\log(1+r))\right]^{1/2}}, \quad (4)$$

где переопределены переменные: $\beta = \sigma\tau E_{py}$, $\alpha = \tau E_{ph}$, $r = \frac{I}{I_d}$.

Таким образом, в работе получено выражение, позволяющее оценить влияние изменения температуры на ширину лазерного пучка при формировании пироэлектрических пространственных солитонов в кристалле ниобата лития.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Список литературы

1. Safioui J., Devaux F., Chauvet M. // Optics Express. 2009. V. 17(24). P. 22209-22216.
2. Shandarov V. et. al. // Advanced Solid State Lasers. OSA. 2015. P. ATu2A.2.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. КОСТРИЦКИЙ, А.В. ЯЦЕНКО[1], Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ

НПК «Оптолинк», Зеленоград

[1]Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВЛИЯНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ ЁМКОСТИ НА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ НА X-СРЕЗЕ $LiNbO_3$

Проведены измерения пироэлектрического напряжения, появляющегося у интегрально-оптических модуляторов с различной топологией электродов для чипов, изготовленных на пластинах X-среза кристаллов ниобата лития. Установлено, что пироэлектрический отклик пропорционален скорости изменения температуры и зависит от межэлектродной ёмкости модулятора.

S.M. KOSTRITSKII, A.V. YATSENKO[1], Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV

Optolink Ltd, Zelenograd

[1]V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

INFLUENCE OF INTER-ELECTRODE CAPACITANCE ON PYROELECTRIC RESPONSE OF INTEGRATED-OPTICAL MODULATORS UTILIZING X-CUT $LiNbO_3$ CHIPS

The pyroelectric response of integrated-optical modulators has been studied for modulators utilizing x-cut $LiNbO_3$ chips with different topologies of electrodes. It has been established, that pyroelectric voltage is proportional to the temperature scanning rate and depends on inter-electrode capacitance.

Кристалл ниобата лития (НЛ) обладает пироэлектрическим эффектом, поэтому быстрое изменение температуры вызывает появление большого электрического поля из-за долгого времени характерного для релаксации и компенсации пироэлектрических зарядов в кристаллах НЛ [1]. У интегрально-оптических модуляторов (ИОМ), выполненных на основе кристалла НЛ X-среза, заряды накапливаются на боковых гранях чипа, которые находятся дальше от области волноводов и электродов, чем в случае с модуляторами Z-среза, поэтому данный эффект слабее влияет на стабильность работы модуляторов на основе кристаллов X-среза [1, 2]. Однако, напряженность поля на поверхности X-среза достигает 0,5 кВ/см при изменении температуры на 1 К [1]. Поэтому целью работы является

экспериментальное исследование пироэлектрического эффекта и уменьшение влияния этого эффекта на работу электрооптических ИОМ.

Для измерения электрического отклика чипа ИОМ, электроды ИОМ подключались к входу электрометра. ИОМ являлся частью многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) [3], изготовленного на пластинах ниобата лития X-среза и содержащего канальные протонообменные волноводы и копланарные Au/Cr-электроды.

При изменении температуры наблюдаются две компоненты пироэлектрического отклика: 1 – медленно меняющаяся компонента; 2 - мощные короткие (≈ 0,08 ÷ 0,11 мсек) импульсы (рис. 1). Установлено, что амплитуды обоих компонент и частота появления импульсов пропорциональны скорости изменения температуры *S* и зависят от межэлектродной ёмкости *C* для копланарных электродов ИОМ.

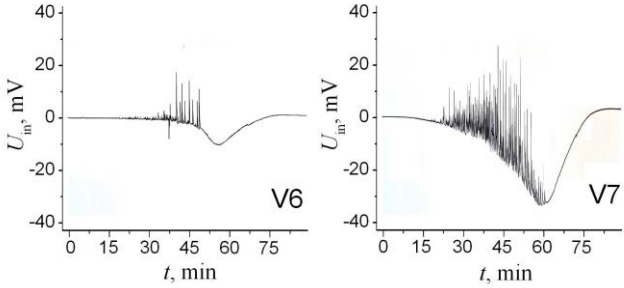


Рис. 1. Зависимость пироэлектрического напряжения U_{in} от времени нагрева *t*, возникающего на электродах ИОМ при различных вариантах топологии электродов ИОМ и дополнительных электродов [1] на полярных гранях чипа; этим вариантам соответствуют разные межэлектродные ёмкости *C* – для V6: *C* = 1,9 пФ; и для V7: *C* = 5,1 пФ; в обоих вариантах скорость изменения температуры *S* плавно возрастает от $S \leq 0.1$ К/мин (at $t \leq 5$ мин) до максимального значения $S = 1.5$ К/мин при $53 \leq t \leq 62$ мин, а затем плавно уменьшается до нуля при $t \geq 84$ мин

Таким образом, паразитный пироэлектрический отклик может быть значительно уменьшен с помощью дальнейшего улучшения топологии электродов ИОМ, уменьшающего *C* [2], и нанесения дополнительных электродов на полярные грани чипа ИОМ.

Список литературы

1. Ponomarev R.S. et. al. // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 4585.
2. Skeath P. et. al. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. P. 1221.
3. Kostritskii S.M. // Appl. Phys. B. 2009. V. 95. P. 421.

УДК 535(06)+004(06)

Р.А. АСТАФУРОВ, В.В. ГАЛУЦКИЙ, С.С. ИВАШКО,
А.В. ШАПОВАЛОВ
Кубанский государственный университет», Краснодар

ПОГЛОЩЕНИЕ НИОБАТА ЛИТИЯ И НИОБАТА КАЛИЯ В ТГц ДИАПАЗОНЕ

Представлены данные о поляризационно-зависимых спектрах поглощения в выращенных кристаллах ниобата лития и ниобата калия. Для X и Z-среза $LiNbO_3$ на частоте 1 ТГц разница коэффициентов поглощения составляет 5 $см^{-1}$.

R.A. ASTAFUROV, V.V. GALUTSKIY, S.S. IVASHKO,
A.V. SHAPOVALOV
Kuban State University, Krasnodar

ABSORPTION OF LITHIUM NIOBATE AND POTASSIUM NIOBATE IN THE THz RANGE

The work presents data on the polarization-dependent absorption spectra in the grown crystals of lithium niobate and potassium niobate. For the X and Z cuts of $LiNbO_3$ at a frequency of 1 THz, the difference in the absorption coefficients is 5 cm^{-1}.

Одним из перспективных нелинейно-оптических устройств для преобразования сигналов является периодически поляризованный ниобат лития. Электрооптический модулятор, изготавливаемый из пластины ниобата лития, вырезанной перпендикулярно оси X, также относится к широкораспространённым нелинейно-оптическим устройствам на основе ниобата лития. Т.е. для изготовления практических нелинейно-оптических устройств применяют пластины, вырезанные из ниобата лития вдоль оси Z и вдоль оси X, Z-срез и X-срез соответственно. Дальнейшим развитием ниобата лития как нелинейно-оптического материала является рассмотрение его нелинейно-оптических свойств в ТГц диапазоне. В данном случае преобразование входных сигналов в сигнал из ТГц диапазона в режиме квазифазового синхронизма на периодической доменной структуре требует учета не только частотной дисперсии в данном диапазоне, но и учета коэффициента поглощения ТГц сигнала.

Для измерения коэффициентов поглощения ниобата лития в ТГц диапазоне использовались пластины, вырезанные из выращенных в КубГУ методом Чохральского с жидкостной подпиткой кристаллов $LiNbO_3$ [1]. Ориентирование образцов производилось оптическими и

рентгеновскими методами. После ориентирования производилась распиловка образцов на пластины толщиной 2 мм. После этого осуществлялась полировка образцов. Подготовленные образцы помещались в терагерцовый спектрограф Tera K15. Результаты измеренных спектров поглощения для пластин, ориентированных вдоль оси Z и вдоль оси X представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что коэффициент поглощения $LiNbO_3$ составляет значительную величину в ТГц диапазоне, Однако для пластины, вырезанной перпендикулярно оси X (X-cut) коэффициент поглощения на 5 см$^{-1}$ меньше чем для пластины, вырезанной перпендикулярно оси Z (Z-cut) в частотном диапазоне 0,8 - 1,0 ТГц. Такое высокое значение коэффициента поглощения затрудняет возможность получения ТГц излучения в PPLN устройствах. Для исследования вопроса получения ТГц излучения на другом нелинейно-оптическом материале из семейства перовскитов, $KNbO_3$, обладающим большим значением электрооптических коэффициентов, кристаллы $KNbO_3$ выращивались в КубГУ методом [1]. Скорость вытягивания составила 0,1 мм/ч. Размер полученных кристаллов составил 10 x 15 мм. Из выращенных кристаллов вырезалась и полировалась пластина толщиной 2 мм. Пластина помещалась в терагерцовый спектрограф Тера К15, результат измеренного спектра поглощения представлен на рис. 1. Из рис. 1 видно, что коэффициент поглощения вырезанной из $KNbO_3$ пластины в ТГц диапазоне составляет еще большую величину (22 см$^{-1}$ на частоте 1 ТГц), чем для пластин $LiNbO_3$ ориентаций X-среза и Z-среза. Данное значение коэффициента поглощения будет затруднять получение ТГц излучения с помощью традиционной для PPLN схемы квазисинхронизма, поэтому, как и в случае с $LiNbO_3$, для $KNbO_3$ предлагается схема генерации ТГц излучения в режиме квазисинхронизма в поверхностном слое.

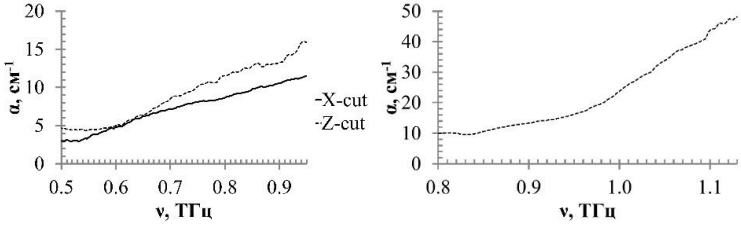


Рис. 1. Спектры поглощения ниобата лития для X и Z-среза (слева) и спектр поглощения ниобата калия при T=300 K (справа)

Список литературы

1. Galutskiy V.V. et. al. // J. of Crystal Growth. 2009. V. 311. P. 1190-1194.

УДК 535(06)+004(06)

А.С. ПЕРИН, Д.В. ОКУНЕВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТЛЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОЛИТОНОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Исследовано взаимодействие пары оптических светлых пространственных солитонов при компенсации дифракционной расходимости лазерного излучения в условиях совместных вкладов фоторефрактивного и пироэлектрического эффектов в нелинейный отклик кристалла ниобата лития.

A.S. PERIN, D.V. OKUNEV
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

INTERACTION OF BRIGHT SPATIAL SOLITONS IN THE PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL OF LITHIUM NIOBATE WITH TAKING INTO ACCOUNT THE PYROELECTRIC EFFECT

The interaction of a pair of optical bright spatial solitons under compensation of the diffraction divergence of laser radiation under conditions of the combined contributions of the photorefractive and pyroelectric effects to the nonlinear response of a lithium niobate crystal is studied.

Оптические пространственные солитоны, в частности пироэлектричекие (ПЭ) солитоны [1], широко исследовались в последние несколько лет. ПЭ-солитоны образуются при компенсации дифракционной расходимости лазерного излучения за счет вклада пироэлектрического эффекта [1, 2]. Целью работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование взаимодействия ПЭ-солитонов в кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$).

В экспериментах использовался нелегированный образец $LiNbO_3$ Z-среза. Световые пучки в образце распространялись в направлении, параллельном оси X. Поляризация формирующего солитон светового поля соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Диаметры световых пучков, формируемых оптической системой экспериментальной установки на входной грани кристалла, составляли 15 мкм, а

интенсивность каждого из них 5 мВт/см^2. Для установления солитонного режима образец нагревался с помощью элемента Пельтье до температуры 55 ˚С. На рис. 1*а* приведены результаты экспериментов и расчетные данные – временные зависимости отношения расстояния между центрами световых пучков на входной ($H_{вх}$) и выходной ($H_{вых}$) плоскостях образца, распространяющихся в режиме синфазных светлых пространственных солитонов. На рис. 1*б* представлены картины распределения интенсивности оптических солитонов, распространяющихся при различных начальных расстояниях между центрами пучков на входной грани образца.

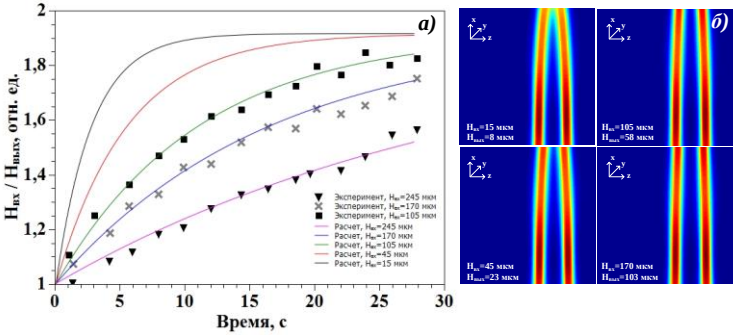


Рис. 1. Графики зависимости (*а*) отношения расстояний между центрами световых пучков и смоделированные картины распределения интенсивности (*б*)

Таким образом, в работе исследовано взаимодействие пары светлых ПЭ-солитонов при их распространении в кристалле ниобата лития на длине волны света 532 нм. Экспериментально и путем компьютерного моделирования показано, что формирующиеся возмущения оптических свойств среды приводят к непрямолинейным траекториям распространения световых пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Список литературы

1. Safioui J., Devaux F., Chauvet M. // Optics Express. 2009. V. 17(24). P. 22209-22216.
2. Shandarov V. et. al. // Advanced Solid State Lasers. OSA. 2015. P. ATu2A.2.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ТЕПЛЯКОВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ НОМИНАЛЬНО ЧИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3$ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

Выполнены исследования фотоэлектрических полей кристаллов ниобата лития конгруэнтного и стехиометрического составов различного генезиса. Показано, что методом HTTSSG из конгруэнтного расплава с добавлением флюса 6.0 вес. % K_2O можно получать близкие к стехиометрическим кристаллы $LiNbO_3$, но при этом значительно превосходящие их по оптической однородности и фотоэлектрическим параметрам.

N.A. TEPLYAKOVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region

PHOTOELECTRIC FIELDS OF NOMINALLY PURE $LiNbO_3$ CRYSTALS OF DIFFERENT GENESIS

A research of photoelectric fields was carried out for lithium niobate crystals of congruent and stoichiometric compositions of different genesis. It was shown that HTTSSG method allows one to obtain near-stoichiometric $LiNbO_3$ crystals from a congruent melt with addition 6.0 wt% flux K_2O. Such crystals have much higher optical uniformity and photoelectric parameters than crystals obtained due a traditional methods.

Для создания оптических материалов для лазерных сред и преобразования излучения с субмикронными периодически поляризованными доменными структурами стехиометрические кристаллы $LiNbO_3$ имеют существенное преимущество по сравнению с конгруэнтными кристаллами ввиду наличия у них более низкого (в пять раз) коэрцитивного поля. Однако при выращивании $LiNbO_3$стех из расплава с 58.6 мол. % Li_2O существует высокая неоднородность показателя преломления вдоль оси роста, что делает невозможным их практическое применение. Кроме того, кристаллы $LiNbO_3$стех обладают гораздо более высоким, чем конгруэнтные кристаллы, эффектом фоторефракции и фотоиндуцированным рассеянием света, что может существенно снизить эффективность нелинейно-оптических преобразований.

В данной работе по параметрам индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) с использованием подхода, предложенного в работе [1] были определены значения напряженностей фотовольтаического и диффузионного электрических полей кристаллов $LiNbO_3$ различного генезиса.

Значения фотоэлектрических полей (фотовольтаического E_{pv} и диффузионного E_D) и угол раскрытия индикатрисы ФИРС (q,°) максимальны для кристалла $LiNbO_3$стех(6.0 вес. % K_2O), табл. 1. Для кристалла $LiNbO_3$конгр индикатриса ФИРС не раскрывается при данной мощности лазерного излучения (160 мВт). В кристаллах $LiNbO_3$стех и $LiNbO_3$стех(6.0 вес. % K_2O) раскрытие спекл-структуры индикатрисы ФИРС осуществляется в течение ~ 60 с. При этом индикатриса ФИРС асимметрична, причем величина асимметрии спекл-картины ФИРС существенно зависит от состава кристалла.

Таблица 1. Фотоэлектрические параметры ФИРС кристаллов ниобата лития

Кристалл	E_{pv}, В/см	E_D, В/см	θ,°
$LiNbO_{3конгр}$	6232	81.0	-
$LiNbO_{3стех}$	3178	1360	46
$LiNbO_{3стех}$ (6 вес. % K_2O)	6855	2508	56

Таким образом, метод HTTSSG (High temperature top speed solution growth) выращивания стехиометрических кристаллов из конгруэнтного расплава с добавлением ~ 6 вес. % флюса K_2O позволяет получать кристаллы близкие по составу к стехиометрическим кристаллам. При этом кристаллы $LiNbO_3$стех(6.0 вес. % K_2O) превосходят кристаллы $LiNbO_3$стех по оптической однородности. По значению фотовольтаического поля, которое определяет величину эффекта фоторефракции, кристаллы $LiNbO_3$стех(6.0 вес. % K_2O) приближаются к кристаллам $LiNbO_3$конгр, но отличаются от них большей величиной диффузионного поля и наличием ФИРС. ФИРС и величина угла раскрытия ФИРС в кристалле $LiNbO_3$ определяются, по-видимому, величиной диффузионного поля, при этом величина диффузионного поля выше в кристаллах характеризующихся повышенной концентрацией мелких ловушек электронов.

Список литературы

1. Goulkov M., Imlau M., Woike Th. Photorefractive parameters of lithium niobate crystals from photoinduced light scattering // Phys. Rev. 2008. V. B77. P. 235110.

УДК 535(06)+004(06)

Д.К. РОМАНЕНКО, А.В. СОКОЛЬНИКОВ, М.Н. ГАППАРОВА, О.А. КАРАНКЕВИЧ, А.С. ПЕРИН
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

В работе экспериментально продемонстрирована компенсация дифракционной расходимости лазерного светового пучка мощностью 100 мкВт и длиной волны 532 нм с диаметром 27,5 мкм при его распространении в нелегированном кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта. Установлено, что полная компенсация дифракционного уширения и формирование пироэлектрического пространственного солитона происходит при нагревании образца на величину 10 градусов по Цельсию через 10 с.

D.K. ROMANENKO, A.V. SOKOLNIKOV, M.N. GAPPAROVA, O.A. KARANKEVICH, A.S. PERIN
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE COMPENSATION OF THE DIFFRACTION DIVERGENCE OF LASER BEAMS IN A CRYSTAL OF LITHIUM NIOBATE

The work experimentally demonstrated the compensation of the diffraction divergence of a laser light beam with a power of 100 μW and a wavelength of 532 nm with a diameter of 27.5 μm when it propagates in an undoped crystal of lithium niobate taking into account the contribution of the pyroelectric effect. It was found that complete compensation of diffraction broadening and the formation of a pyroelectric spatial soliton occurs when the sample is heated by 10 degrees of Celsius after 10 seconds.

В современных интегрально-оптических схемах базовыми элементами являются оптические волноводы. Одним из распространенных материалов для изготовления таких элементов является сегнетоэлектрический кристалл ниобата лития. Существующие способы формирования волноводных структур в этом кристалле отличаются сложной технической реализацией [1]. Относительно простым в реализации является метод оптического индуцирования, суть которого заключается в том, что формирование волноводных структур происходит за счет модуляции показателя преломления кристалла в освещенной области при

распространении в образце пироэлектрических пространственных солитонов [2]. Важным параметром, характеризующим вклад пироэлектрического эффекта, является изменение температуры кристалла [3]. Целью данной работы является исследование температурной зависимости компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта.

В экспериментах использовался нелегированный кристалл $LiNbO_3$, размером 20×7×1 мм^3 вдоль осей X, Y, Z соответственно. Источником излучения являлся твердотельный лазер YAG:Nd^{3+} (длина волны света $\lambda = 0{,}532$ мкм). На рис. 1а-г) приведены результаты эксперимента, демонстрирующие компенсацию дифракционного уширения лазерного пучка диаметром 27,5 мкм, мощность которого равнялась 100 мкВт. Полная компенсация дифракционных искажений достигалась при нагреве кристалла на величину $\Delta T = 10$ ºС в течение 10 с (рис. 1д).

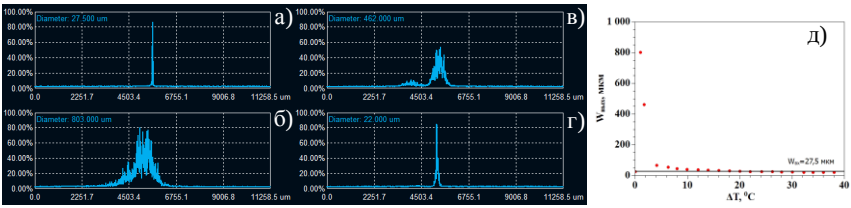


Рис. 1. Профили распределения интенсивности лазерного пучка мощностью излучения 100 мкВт: в начальный момент времени на входной грани (а); в начальный момент времени на выходной грани при ΔT=0 ºС (б); на выходной грани через t=5 с и ΔT=5 ºС (в); на выходной грани через t=10 с и ΔT=10 ºС (г), график зависимости изменения ширины пучка от изменения температуры (д)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Список литературы

1. Courjal N., et. al. // Emerging Waveguide Technology. 2018. P. 153-174.
2. Shandarov V., et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 70. P. 754-757.
3. Ryabchenok V., et .al // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 867(1). P. 012026.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. АНИКЬЕВ, М.Ф. УМАРОВ[1], Э.Н. АНИКЬЕВА[2]
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[1]Вологодский государственный университет
[2]Мичуринский государственный аграрный университет, Тамбовская обл.

ПРОЯВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ В СПЕКТРАХ КВАЗИУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Получены спектры рассеяния света на полно-симметричных колебаниях в конгруэнтных кристаллах ниобата лития, различной степени несовершенства. По спектральному распределению комбинационного рассеяния света при комнатной температуре рассчитана обобщенная восприимчивость в низкочастотной области. Показано, что обобщенная восприимчивость на низких частотах в образцах ниобата лития различной добротности может быть аппроксимирована в модели ангармонического осциллятора, связанного через затухание с релаксацией акустических колебаний на дислокациях.

A.A. ANIKIEV, M.F. UMAROV[1], E.N. ANIKIEVA[2]
Bauman Moscow State Technical University
[1]Vologda State University
[3]Michurinsk State Agrarian University, Tambov region

EXHIBITION OF ACOUSTIC DENSITY OF STATES IN THE QUASIELASTIC LIGHT SCATTERING SPECTRA OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

The spectra of light scattering on full-symmetric oscillations in congruent lithium niobate crystals of different degrees of imperfection are obtained. The generalized susceptibility in the low-frequency region is calculated from the spectral distribution of Raman scattering at room temperature. It is shown that the generalized susceptibility at low frequencies in lithium niobate samples of different q-values can be approximated in the model of anharmonic oscillator associated through attenuation with relaxation of acoustic oscillations at dislocations.

Исследованы спектры комбинационного рассеяния в низкочастотной области и квазиупругого рассеяния света в конгруэнтных кристаллах ниобата лития с дефектами стехиометрии. Эксперименты проводились на образцах, выращенных при различных скоростях вытягивания; напряжения, возникающие в образцах при таких условиях, приводили к образованию дислокаций с плотностью, пропорциональной скорости

вытягивания затравки. Степень дефектности образцов оценивалась по акустической добротности, измеренной резонансным радиотехническим методом. С ростом концентрации дефектов, в данном случае дислокаций происходило существенное уширение линий низкочастотных оптических мод A_1(TO) – симметрии с одновременным возрастанием интенсивности квазиупругого рассеяния на крыле линии Рэлея. Поведение интенсивности рэлеевского рассеяния на дефектах хорошо описывается в модели взаимодействия квазигармонического осциллятора с затуханием и медленными движениями акустических мод на дефектах с характерным временем релаксации τ(C), где C – концентрация дислокаций. Сила связи между оптической модой и релаксацией акустических фононов на дефектах δ^2 (C) зависит от концентрации дефектов, и связь между этими возбуждениями происходит через затухание. Хорошее согласие эксперимента с использованной моделью позволила оценить характер зависимости затухания оптического фонона, силу связи и время релаксации от концентрации дефектов: эти величины экспоненциально возрастают при уменьшении акустической добротности (увеличении плотности дислокаций) в образцах.

Нормированная на бозе-фактор спектральная интенсивность квазиупругого рассеяния на низких частотах показывает квадратичную зависимость от частоты: в логарифмическом масштабе на частотах 10 – 40 см$^{-1}$ приведенная спектральная интенсивность линейно зависит от частоты с показателем степени ν^{α}, $\alpha \approx 2.1$, что подтверждает релаксационный механизм рэлеевского рассеяния света на дефектах.. Результаты работы могут иметь определенный интерес с точки зрения оценки вклада дефектов в интенсивность рассеяния света в окрестности структурных фазовых переходов, так как неустойчивость решетки может быть получена не только путем внешних воздействий на кристалл, но также условиями выращивания кристаллов с контролируемой концентрацией дефектов. Кроме того, чувствительность интенсивности квазиупругого рассеяния света от концентрации дефектов может служить количественным признаком степени дефектности структуры. Причем построение калибровочной кривой для определения добротности при комнатной температуре из спектров рассеяния света можно проводить двумя способами: по интенсивности рассеяния линии резонанса акустических фононов на частоте 120 см$^{-1}$ и по интенсивности квазиупругого рассеяния на низких частотах. Полученные результаты позволяют по спектрам КРС оценить степень дефектности структуры конгруэнтных кристаллов ниобата лития.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. СИДОРОВ, Р.А. ТИТОВ, Н.А. ТЕПЛЯКОВА,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ
Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.

ВЛИЯНИЕ БОРА НА СТРУКТУРНУЮ ОДНОРОДНОСТЬ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

Показано, что применение структурированного бором расплава позволяет выращивать монокристаллы ниобата лития с регулируемыми вторичной структурой, величиной фотоэлектрических полей, концентрацией OH-групп и повышенным сопротивлением оптическому повреждению.

N.V. SIDOROV, R.A. TITOV, N.A. TEPLYAKOVA,
M.N. PALATNIKOV
I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region

BORON INFLUENCE ON STRUCTURAL HOMOGENEITY AND OPTICAL PROPERTIES OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS

It is shown that lithium niobate crystals with controlled secondary structure, magnitude of photoelectric fields, OH-group concentration and increased resistance to optical damage may be grown from the melt structured by boron.

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), спектроскопии ИК-поглощения, оптической спектроскопии, фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС), лазерной коноскопии, исследовано состояние дефектной структуры номинально чистых кристаллов ниобата лития ($LiNbO_3$), выращенных из шихты, легированной бором. Для всех кристаллов исследован эффект фоторефракции и определены фотоэлектрические поля (фотовольтаическое и диффузионное). Результаты исследований сравнивались с результатами, полученными для номинально чистых кристаллов конгруэнтного ($LiNbO_{3конг}$, R = Li/Nb = 0.946) и стехиометрического ($LiNbO_{3стех}$, R = 1) составов. Все кристаллы выращивались в воздушной атмосфере методом Чохральского на

установке «Кристалл-2». Кристалл $LiNbO_{3конг}$ был выращен из расплава конгруэнтного состава, кристалл $LiNbO_{3стех}$ – из расплава с избытком Li_2O (58.6 мол. %). Методом прямого легирования были получены кристаллы $LiNbO_3$:B (0.55 - 0.83 мол. % B_2O_3 в шихте) [1], методом гомогенного легирования Nb_2O_5 – кристалл $LiNbO_3$:B (1.24 мол. % B_2O_3 в шихте) [2].

Элемент бор не входит в структуру кристалла $LiNbO_3$. Несмотря на высокое содержание бора в шихте (до 2.0 мол. %), его концентрация в кристалле находится на уровне следовых количеств, т.е. на порядки ниже концентрации легирующих металлических добавок. Отсутствие бора в структуре кристаллов можно объяснить малым размером радиуса катиона B^{3+} ~ 0.2 Å (ионные радиусы Li^+ и Nb^{5+} = 0.68 Å) и невозможностью октаэдрической координации иона B^{3+} в структуре кристалла. Однако оксидные соединения бора, как сильные комплексообразователи и растворители, оказывают заметное влияние на структуру и физические характеристики расплава, а, следовательно – на структуру выращенного кристалла. Для кристалла $LiNbO_3$:B наблюдается увеличение температуры плавления (1264 °C) по сравнению с номинально чистым кристаллом ниобата лития конгруэнтного состава (1257 °C). Определенным образом структурируя расплав, примесь бора уменьшает количество дефектов Nb_{Li} и снижает содержание неконтролируемых многозарядных примесей (Fe, Cu и др.) тем самым, понижая эффект фоторефракции, повышая его структурную и оптическую однородность.

Таким образом, осуществлен подход к получению монокристаллов $LiNbO_3$ с заданными свойствами, когда определенным образом химически активным элементом структурируется расплав, но при этом легирующая добавка не входит в структуру кристалла. Этот подход позволяет путем направленного структурирования расплава получать номинально чистые кристаллы $LiNbO_3$, обладающие такими же свойствами, как и легированные кристаллы, но по упорядочению структурных единиц катионной подрешетки и дефектам Nb_{Li} приближающиеся к кристаллу стехиометрического состава. В тоже время монокристаллы $LiNbO_3$:B обладают существенно меньшим эффектом фоторефракции, чем стехиометрические кристаллы.

Список литературы

1. Palatnikov M.N., Biryukova I.V. et. al. // J. Cryst. Growt. 2014. V. 386. P. 113-118.
2. Palatnikov M.N., Biryukova I.V. et. al. // Inorg. Mat. 2013. V. 49. I. 7. P. 765-770.

УДК 535(06)+004(06)

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ[1], Н.А. ТЕПЛЯКОВА[1], М.Н. ПАЛАТНИКОВ[1]

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
[1]Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.

КОНОСКОПИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ

Метод лазерной коноскопии применен для исследования оптической однородности кристаллов $LiNbO_3:B^{3+}$(0.12 вес. %). Зарегистрировано отсутствие дополнительных аномалий в коноскопических картинах при увеличении мощности лазерного излучения, обусловленных наличием статических и флуктуирующих дефектов, наведенных в фоторефрактивном кристалле лазерным излучением.

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV[1], N.A. TEPLYAKOVA[1], M.N. PALATNIKOV[1]

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
[1]I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region

CONOSCOPIC CONTROL OF OPTICAL HOMOGENEITY OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS DOPED BY BORON

The laser conoscopy method was used to study the optical homogeneity of $LiNbO_3:B^{3+}$ crystals (0.12 wt.%). The absence of additional anomalies in conoscopic patterns was detected with an increase in the laser radiation power due to the presence of static and fluctuating defects induced in the crystal by laser radiation.

Повышение оптической стойкости конгруэнтных кристаллов $LiNbO_3$ можно получить путем легирования кристалла $LiNbO_3$ (R = Li/Nb = 0.946) металлическими «нефоторефрактивными» катионами. Такое легирование, особенно при значительных концентрациях легирующей добавки, приводит к оптической и структурной неоднородности монокристалла. Неметаллические катионы, обладающие иными, чем у металлических катионов, механизмами химической связи и, как следствие, другими механизмами влияния на физические характеристики системы кристалл-расплав, не способны входить в структуру кристалла $LiNbO_3$ [1].

Кристалл ниобата лития в идеальных условиях является одноосным, но под действием напряжений, возникающих при легировании и термической предыстории получения монокристалла, в плоскости, перпендикулярной его оптической оси, может приобретаться аномальная двуосность, которая проявляется на коноскопической картине в виде расхождения изогир на угол 2V, который характеризует деформацию оптической индикатрисы [2]. Коноскопические (интерференционные) картины высокого качества размером до 0,5 м, получаемые на полупрозрачном экране при прохождении расходящегося пучка излучения через кристаллические пластинки, помещенные между скрещенными поляризатором и анализатором, позволяют регистрировать отступления от оптической однородности кристалла. Результаты показали наличие двух видов коноскопических картин (характерных для одноосного кристалла (рис. 1, фрагменты 1 и 3), а также коноскопических картин с признаками аномальной оптической двуосности (рис. 1, фрагменты 2 и 4) для образцов в виде параллелепипедов толщиной 10 мм как при малой мощности лазерного излучения 1 мВт, так и при увеличении ее до 90 мВт. При увеличении мощности лазерного излучения не обнаружено появления дополнительных аномалий в коноскопических картинах, обусловленных наличием статических и флуктуирующих дефектов, наведенных лазерным излучением. Отличия коноскопических картин от идеальных обусловлены структурной неоднородностью кристаллов.

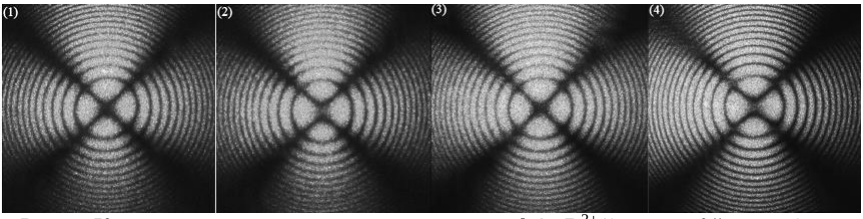


Рис. 1. Коноскопические картины кристалла $LiNbO_3:B^{3+}$(0.12 вес. %), Z = 10 мм, λ = 532 нм, P = 1 мВт (1) и (2); P = 90 мВт (3) и (4)

В целом образцы обладают высокой оптической однородностью, при этом в соответствии с расчетом максимальное значение угла аномальных оптических осей для образца $LiNbO_3:B^{3+}$(0.12 вес. %) составляет 2V = 10´. Величина аномального двулучепреломления составляет $\Delta n = 0{,}02 \cdot 10^{-5}$.

Список литературы

1. Сидоров Н.В. и др. // Журнал технической физики. 2018. Т. 88 (12). С. 1820.
2. Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О. Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука, 2004.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. СТРОГАНОВА, В.В. ГАЛУЦКИЙ, Н.Н. НАЛБАНТОВ, И.Г. ПОНЕТАЕВА
Кубанский государственный университет», Краснодар

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА РАССЕИВАЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn)

Исследован состав рассеивающих дефектов градиентно-активированного кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn).

E.V. STROGANOVA, V.V. GALUTSKIY, N.N. NALBANTOV, I.G. PONETAEVA
Kuban State University, Krasnodar

INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF SCATTERING DEFECTS IN $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) CRYSTALS

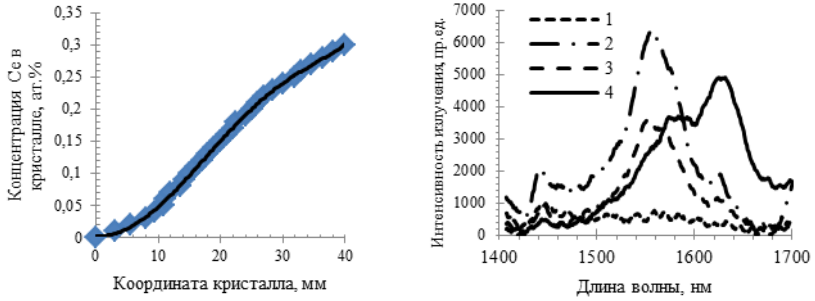
The composition of scattering defects of gradient-activated crystal $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn)

Целью данного исследования является изучение состава рассеивающих дефектов, возникших в процессе выращивания градиентно-активированного кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn). В исследуемом образце реализован концентрационный профиль ионов церия вдоль кристаллической були (рис. 1*а*) при постоянной концентрации ионов Zn^{2+} и Er^{3+}. Кристаллы $LiNbO_3$:Er традиционно демонстрируют многоканальную излучательную релаксацию [1], поэтому ионы Ce^{3+} в кристаллическую матрицу $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) добавлены как ионы-релаксаторы, потенциально повышающие эффективность 1,5 мкм излучения и шунтирующие излучение в области 3 мкм [2]. Ионы Zn^{2+} в полученном образце являются антифоторефрактивной примесью [3].

Необходимость исследовать рассеивающие дефекты в полученном кристалле обусловлена сложностью получения спектров усиления исследуемого образца $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) и низкой квантовой эффективностью излучения в области 1,5 мкм, спектр которого представлен на рис. 1*б*.

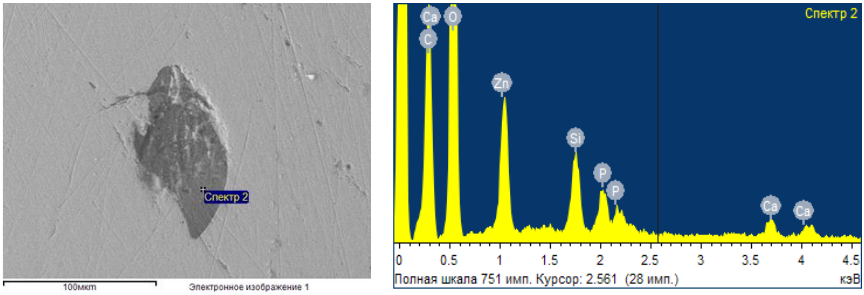
Методами микроскопии и элементного анализа исследуемого образца были получены изображения рассеивающих дефектов (рис. 2*а*) и их элементный анализ (рис. 2*б*). В результате получено, что включения

содержат такие химические элементы, как Ca, C, O, Zn, Si, P. Как видно, помимо химических элементов-базисов кристаллической матрицы присутствуют элементы неконтролируемых примесей, которые могут являться центрами рассеивания энергии электронного возбуждения.



а *б*

Рис. 1. Концентрационный профиль градиентно-активированного кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) (*а*) и его спектрально-генерационные характеристики в сравнении с параметрами кристалла $LiNbO_3$:Er: 1 – спектр усиления кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn); 2 – спектр излучения кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) при мощности оптической накачки 0,96 Вт; 3 – спектр излучения кристалла $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) при мощности 0,5 Вт; 4 – спектр генерационного излучения кристалла $LiNbO_3$:Er при мощности 0,67 Вт (*б*)



а *б*

Рис. 2. Фото дефектов кристаллов $LiNbO_3$:Er(Ce,Zn) (*а*) и результаты его элементного анализа (*б*)

Список литературы

1. Строганова Е.В., Налбантов Н.Н. и др. // Автометрия. 2017. Т. 53 (1). С. 94-99.
2. Lebedev V.A., Voroshilov I.V. et. al. // Obninsk. 1999. P. 88-89.
3. Палатников М.Н., Бирюкова И.В. и др. // Перспективные материалы. 2016. № 1.С. 5-13.

УДК 535(06)+004(06)

О.Р. СТАРОДУБ, В.М. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

Нами впервые выполнено моделирование структуры ниобата лития на основании не элементарных ячеек, а кислородных октаэдров. Показано, что существует энергетически выгодный, имеющий оптимум энергии, размер кластера, внутри которого организуется определённая структура, стремящаяся к структуре конгруэнтного кристалла. Также нами определено, что из-за потери электронейтральности стехиометрический кристалл не может существовать, поэтому желаемых свойств, в том числе фоторефрактивного эффекта, следует добиваться введением различных примесных ионов. Примером примесного иона был выбран ион с зарядом 3+.

O.R. STARODUB, V.M. VOSKRESENSKIY, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of FRC «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region

COMPUTER SIMULATION OF THE CLUSTER STRUCTURE OF AN OXYGEN-OCTAHEDRAL LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

We have performed a computer simulation of processes taking place at formation of energetic equilibrium oxygen-octahedral clusters in a ferroelectric phase of a stoichiometric lithium niobate crystal (LN, $LiNbO_3$). We have established that there is an energy efficient cluster size with a specific structure that approaches a congruent LN structure. We have also proved that stoichiometric composition of LN leads to loss of electrical neutrality; thus achievement of demanded properties including photorefractive ones is possible by doping. We have chosen an ion with a charge 3+ to build a model.

Разработанный нами пакет программ позволяет учитывать структурные дефекты в катионной подрешетке и геометрические искажения кислородных октаэдров для сильно разупорядоченных структур, подобных ниобату лития. С помощью программы KeClast

дефекты моделируются непосредственно в структуре кластеров. При минимизации энергии кластера применяется механизм пошаговой оптимизации критических атомов, включающий два последовательных этапа: движение и удаление критических атомов.

Для формирования нужной структуры кластера расчёт ведется на основании кислородных октаэдров, а не элементарных ячеек. Данный подход к расчету кластеров в структуре кристалла ниобата лития позволяет сохранить электронейтральность модельного кластера и не допустить разорванности структуры кислородных октаэдров на границах кластера.

В каркас из кислородных октаэдров помещаются катионы Li^{+} и Nb^{5+}, вакансии и примесные ионы методом случайного заброса до полного заполнения всех октаэдров [1].

При проведении расчётов был выявлен кластер определённого размера, который имеет минимум энергии, и внутри которого образуется структура, стремящаяся к структуре конгруэнтного кристалла ниобата лития. В каждом рассчитанном случае отношение Li/Nb в результате оптимизации падает примерно на 0,3 - 0,35, что следует учитывать при росте кристаллов. Также показана невозможность получения идеального кластера ниобата лития стехиометрического состава, поскольку в нём не сохраняется электронейтральность, которую возможно сохранить только при уходе от стехиометрического к конгруэнтному кластеру.

Далее в моделируемый кластер был введен примесной ион, имеющий заряд 3^{+}, произведена минимизация кластера с примесным ионом при различных исходных соотношениях Li/Nb и рассчитана энергия после минимизации для разных количеств примеси. Рассматривались три варианта количества примеси: 1,67 % октаэдров, занятых примесным ионом, 2,33 и 3,33 %.

Введение примесного иона в моделируемый кластер увеличивает энергию этого кластера, разупорядочивая структуру. Однако в области полученного после минимизации соотношения Li/Nb, близкого к конгруэнтному, имеется резкий минимум энергии при концентрации кислородных октаэдров с примесным ионом более 2 % от общего количества октаэдров.

Список литературы

1. Voskresenskii V.M., Starodub O.R., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Investigation of the cluster formation in lithium niobate crystals by computer modeling method // Crystallography Reports. 2017. V. 62. No. 2. P. 205-209.

УДК 535(06)+004(06)

И.О. КИНЯЕВСКИЙ, П.А. ДАНИЛОВ, Н.А. СМИРНОВ,
С.И. КУДРЯШОВ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, А.А. ИОНИН,
Е.Э. ДУНАЕВА[1]
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ФИЛАМЕНТАЦИЯ 515-нм 300-фс ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КРИСТАЛЛЕ $BaWO_4$

Экспериментально исследована филаментация импульсов излучения второй гармоники оптоволоконного фемтосекундного лазера на ионах иттербия (λ = 515 нм, τ = 300 фс) в кристалле $BaWO_4$. Определены пороги филаментации и оптического разрушения поверхности кристалла. Измерены спектры излучения на выходе из кристалла при различных энергиях лазерного импульса.

I.O. KINYAEVSKIY, P.A. DANILOV, N.A. SMIRNOV,
S.I. KUDRYASHOV, L.V. SELEZNEV, A.A. IONIN, E.E. DUNAEVA[1]
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

FILAMENTATION OF 515-nm 300-fs LASER PULSES IN $BaWO_4$ CRYSTAL

Filamentation of second-harmonic ytterbium fiber laser (λ = 515 nm, τ = 300 fs)l was experimentally studied in a $BaWO_4$ crystal. The thresholds of filamentation and surface optical damage of the crystal are measured. The emission output spectra were measured at various laser pulse energies.

При распространении мощных ультракоротких лазерных импульсов в прозрачных средах вследствие взаимного влияния (баланса) дисперсии групповых скоростей, плазменной дефокусировки и нелинейных эффектов (самофокусировки, многофотонного поглощения и ионизации среды) – может возникать явление филаментации, сопровождающиеся временным, пространственным и спектральным изменением характеристик лазерного излучения. Поэтому филаментация может использоваться для получения широкополосного лазерного излучения [1].

В представленной работе экспериментально осуществлена и исследована филаментация импульсов излучения второй гармоники оптоволоконного фемтосекундного лазера на ионах иттербия (λ = 515 нм, ширина линии генерации 1.7 нм (рис. 1), τ = 300 фс) в кристалле $BaWO_4$.

Кристалл $BaWO_4$ номинально чистого состава был выращен методом Чохральского из расплава на воздухе в ИОФ РАН (Отдел лазерных материалов и фотоники). Ориентированные образцы длиной ~ 8 мм были вырезаны из кристалла $BaWO_4$ параллельно и перпендикулярно оптической с-оси.

При фокусировке лазерного излучения на поверхность кристалла линзой с фокусным расстоянием 35 мм наблюдалось оптическое повреждение поверхности при энергии импульса 0.75 мкДж, что соответствует порогу разрушения 0.24 Дж/см^2 (0.8 ТВт/см^2). Однако при смещении фокуса линзы вглубь кристалла оптическое разрушение кристалла не наблюдалось даже при повышении энергии импульсов до 3.4 мкДж (максимальная энергия лазерной системы). При фокусировке лазерного излучения вглубь кристалла и энергии импульса более 0.08 мкДж наблюдалось уширение спектра излучения, обусловленное явлением филаментации. На рис. 1 представлен спектр центральной части лазерного луча на выходе из кристалла при энергии импульса 0.01 мкДж (до появления филаментации) и 3.4 мкДж (с филаментацией). На вставке рис. 1 представлено изображением лазерного излучения на выходе из кристалла после отражения от дифракционной решетки 1200 штр./мм.

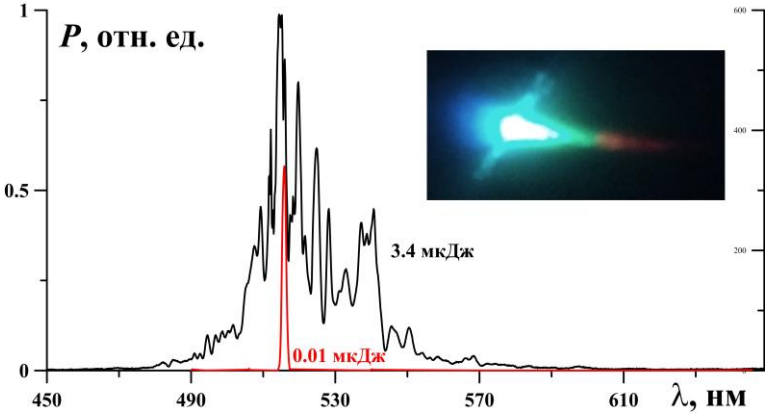


Рис. 1. Спектр излучения второй гармоники оптоволоконного фемтосекундного лазера на ионах иттербия до и после филаментации в кристалле $BaWO_4$

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-70015).

Список литературы

1. Couairon A., Mysyrowicz A. // Phys. Rep. 2007. V. 441. P. 47.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Д. ГУЦЕНКО[1,2], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1,2]
[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Приведены результаты экспериментов по низкотемпературной люминесценции различных политипов SiC (4H и 6H). Обнаружены новые узкие и интенсивные линии люминесценции, потенциально пригодные для практических применений в области квантовой сенсорики. Продемонстрировано поведение спектральных линий при приложении внешнего магнитного поля.

D.D. GUTSENKO[1,2], K.N. BOLDYREV[1,2]
[1]*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

STUDY OF COLOR CENTERS IN SILICON CARBIDE SINGLE CRYSTALS BY HIGH RESOLUTION LUMINESCENT SPECTROSCOPY

The results of experiments on low-temperature luminescence of various SiC high-quality single crystals (with 4H and 6H polytypes) are presented. New narrow and intense luminescence lines have been discovered that are potentially suitable for practical applications in the field of quantum sensors. The behavior of spectral lines upon application of an external magnetic field is demonstrated.

Центры окраски в карбиде кремния представляют большой интерес для различных применений в квантовой сенсорике (создание датчиков магнитного, электрического полей, напряжений, давлений, температуры с высокой чувствительностью), а также конструирования на их основе систем для квантовой памяти [1]. Обладая схожими свойствами с NV-центрами алмаза, некоторые центры окраски в SiC имеют ряд преимуществ, что делает их весьма интересными для исследования [2].

Целью работы является экспериментальное исследование спектров люминесценции и поглощения различных политипов карбида кремния (высококачественных образцов SIC с политипными структурами 4H и 6H), а также изучение поведения линий в магнитном поле, исследование возможных антипересечений спиновых уровней основного и возбуждённого состояний центров окраски [3, 4]. Для осуществления эксперимента по люминесцентной спектроскопии высокого разрешения был использован Фурье-спектрометр Bruker IFS 125HR, возбуждение люминесценции проводились с помощью набора диодных лазеров (с длинами волн возбуждения 365, 405, 523 и 635 нм).

В исследовании были получены чрезвычайно узкие линии в спектрах люминесценции гексагональной модификации SiC (4H, 6H), проведена частичная идентификация линий. Получены спектры антипересечения спиновых уровней V-центров карбида кремния, обнаружены другие особенности в спектрах поглощения и люминесценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-10132).

Список литературы

1. Soltamov V.A., Kasper C., Poshakinskiy A.V., Anisimov A.N., Mokhov E.N., Sperlich A., Tarasenko S.A., Baranov P.G., Astakhov G.V., Dyakonov V. Excitation and coherent control of spin qudit modes with sub-MHz spectral resolution // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 1678.

2. Kraus H., Soltamov V., Riedel D. et. al. Room-temperature quantum microwave emitters based on spin defects in silicon carbide // Nature Phys 2014. V. 10. P. 157-162.

3. Anisimov A., Simin D., Soltamov V., Lebedev S., Baranov P., Astakhov G., Dyakonov V. Optical thermometry based on level anticrossing in silicon carbide // Scientific Reports. 2016. V. 6. P. 33301.

4. Boldyrev K.N., Popova M.N., Malkin B.Z., Abishev N.M. Direct observation of hyperfine level anticrossings in the optical spectra of a $LiYF_4:Ho^{3+}$ single crystal // Phys. Rev. B Rapid. Comm. 2019. V. 99. P. 041105(R).

УДК 535(06)+004(06)

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.И. ИВАНОВА,
С.В. МОЛЧАНОВ
Тверской государственный университет

ИЗЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Проведены измерения удельного электросопротивления моно и поликристаллов германия четырёхзондовым методом в опорных точках. Получены тепловизионные изображения образцов при нагреве до температур 60 - 80 °С. На основании температурных профилей определены значения отклонений удельного электросопротивления в кристаллах германия по объему.

S.A. TRETIAKOV, I.A. KAPLUNOV, A.I. IVANOVA,
S.V. MOLCHANOV
Tver State University

MEASURING OF ELECTRICAL RESISTIVITY OF GERMANY CRYSTALS BY METHOD OF THERMOVISION DEFECTOSCOPY

The electrical resistivity of mono and polycrystals of germanium was measured by the four-probe method at reference points. Thermal images of the samples were obtained during heating to temperatures of 60 – 80 °C. The values of the deviations of the electrical resistivity in germanium crystals were determined on the basis of temperature profiles.

Моно и поликристаллы германия широко применяются в современном приборостроении – для ИК-техники, полупроводниковой техники, детекторов. Применение германия в оптических целях требует его легирования до определенного уровня концентрации примесью n-типа проводимости, что обеспечивает максимальное пропускание излучения в инфракрасном спектральном диапазоне. Легированный германий получают путем выращивания монокристаллов и поликристаллов в основном методами Чохральского и направленной кристаллизации. Распределение легирующей примеси по объему получаемых кристаллов существенно зависит от условий роста и применяемых технологий, неоднородность распределения примеси существенно снижает характеристики приборов на основе германия.

Целью работы являлось исследование распределения легирующей примеси в моно и поликристаллах германия с применением метода тепловизионной дефектоскопии и четырёхзондового метода измерения удельного электросопротивления.

В экспериментах использовались кристаллы германия p- и n-типов, которые нагревались до температуры 60-80 °С. Температурные профили регистрировались в момент, соответствующий максимальным температурным градиентам (рис. 1). Четырёхзондовым методом измерялось удельное электросопротивление в опорных точках. С использованием расчетов по уравнению (1)

$$\rho_x = \frac{(T_x - T_{Sp2})\cdot(\rho_{Sp2} - \rho_{Sp1})}{(T_{Sp2} - T_{Sp1})} + \rho_{Sp2} \qquad (1)$$

(где ρ_{Sp1}, ρ_{Sp2} – удельное сопротивление в опорных и исследуемой точках, T_{Sp1}, T_{Sp2} – соответствующие температуры) и измеренных температурных профилей были построены характеристические кривые удельного электросопротивления (рис. 2).

Полученные результаты позволили обнаружить ряд эффектов ранее не наблюдаемых при контроле кристаллов германия зондовыми методами.

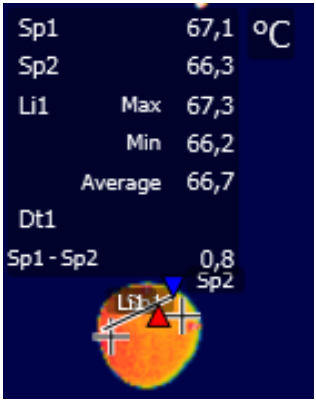


Рис. 1. Тепловизионное изображение монокристалла германия

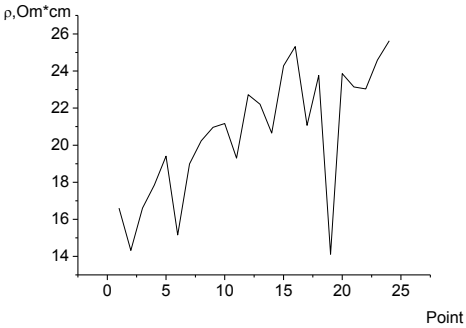


Рис. 2. Профиль удельного электросопротивления, полученный при анализе термограммы

УДК 535(06)+004(06)

А.С. ЕРМАКОВ, А.А. ЛЯПИН, А.А. ШАВЕЛЬЕВ[1],
С.В. ГУЩИН, П.А. РЯБОЧКИНА, В.В. СЕМАШКО[1]
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск
[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет

АПКОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ФТОРИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ СО СТРУКТУРОЙ ШЕЕЛИТА, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+}

В настоящей работе была исследована апконверсионная люминесценция концентрационной серия монокристаллов $BaYLuF_8$:Er при возбуждении на уровень $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+}. Предложены механизмы передачи энергии ответственные за возникновение апконверсионной люминесценции. Для количественной характеризации люминесценции были определены значения энергетический выхода, цветовых координат и цветовых температур. Обсуждается возможность использования кристаллов $BaYLuF_8$: Er для увеличения эффективности солнечных батарей.

A.S. ERMAKOV, A.A. LYAPIN, A.A. SHAVELEV[1],
S.V. GUSHCHIN, P. A. RYABOCHKINA, V.V. SEMASHKO[1]
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk
[1]Kazan Federal University

UPCONVERSION LUMINESCENCE OF FLUORIDE CRYSTALS WITH SCHEELITE STRUCTURE DOPED Er^{3+} IONS

In this work we investigated the upconversion luminescence of concentration series of $BaYLuF_8$: Er single crystals upon excitation of Er^{3+} ions to the $^4I_{13/2}$ level. The energy transfer mechanisms responsible for the upconversion luminescence were suggested. For the quantitative determination of luminescence, the values of energy yield, color coordinates, and color temperatures were determined. The possibility of using $BaYLuF_8$: Er crystals to increase the efficiency of solar cells is discussed.

Апконверсионные материалы нашли различное применение в фотонике. Они используются в твердотельных лазерах, визуализаторах лазерного излучения, датчиках температуры, солнечных элементах и т. д. [1-6]. В данной работе мы сосредоточились на исследовании апконверсионной люминесценции концентрационной серии фторидных

кристаллов $BaYLuF_8$:Er, имеющих структуру шеелита, с целью повышения эффективности солнечных элементов.

В данной работе были зарегистрированы спектры поглощения ионов Er^{3+} в диапазоне 350-1700 нм. При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531,8 нм была выявлена апконверсионная люминесценция, обусловленная переходами $^2H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^5F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, $^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} (рис. 1). Для выяснения механизмов, ответственных за возникновение антистоксовой люминесценции ионов Er^{3+} изучались зависимости интенсивности апконверсионной люминесценции от плотности мощности излучения возбуждения. В исследовании также был рассчитан энергетический выход люминесценции и определены цветовые температуры и координаты цветности.

Проведенное исследование показало, что кристаллы $BaYLuF_8$:Er являются эффективными апконверсионными материалами.

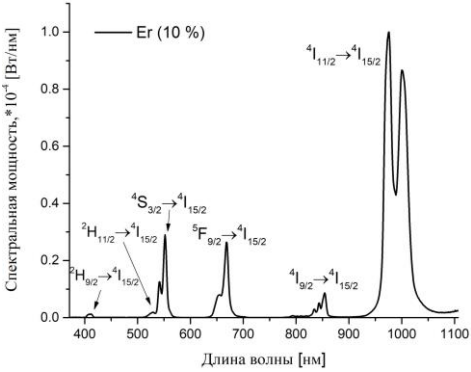


Рис. 1. Спектр апконверсионной люминесценции монокристалла $BaYLuF_8$:Er (10 %) при возбуждении на уровень $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+}

Исследование выполнено за счет средств гранта Президента Российской Федерации проект МК-2168.2019.2.

Список литературы

1. Goldschmidt J., Fischer S. // Adv. Optical Materials. 2015. V. 3. P. 510-537.
2. Burbano D., Naccache R., Capobianco J. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2015. V. 47. P. 273-347.
3. Dong N., Pedroni M. et. al. // ACS Nano. 2011. V. 5. P. 8665-8671.
4. Wang F., Banerjee D. et. al. // Analyst. 2010. V. 135. P. 1839-1854.
5. Ende B., Aarts L., Meijerink A. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2009. V. 11. P. 11081-11095.
6. Trupke T., Shalav A., Richards B., Würfel P., Green M. // Solar Energy Mater. Solar Cells. 2006. V. 90. P. 3327-3338.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. МАКАРЕВИЧ, В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ, В.Н. НАВНЫКО,
М.А. АМАНОВА, С.М. ШАНДАРОВ[1]
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина, Беларусь
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕШАННЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $Bi_{12}TiO_{20}$ ПРОИЗВОЛЬНОГО СРЕЗА

Представлены результаты теоретических исследований по оптимизации процесса считывания смешанных пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном пьезокристалле семейства силленитов $Bi_{12}TiO_{20}$ произвольного среза. Определены оптимальные кристаллические срезы, в которых может быть достигнута наибольшая дифракционная эффективность голограмм.

A.V. MAKAREVICH, V.V. SHEPELEVICH, V.N. NAUNYKA,
M.A. AMANOVA, S.M. SHANDAROV[1]
[1]Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus
[2]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

THEORETICAL OPTIMIZATION OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF MIXED HOLOGRAMS IN A PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL $Bi_{12}TiO_{20}$ OF AN ARBITRARY SLICE

The results of theoretical studies on the optimization of the reading process of mixed transmission holograms formed in a photorefractive piezoelectric crystal of the $Bi_{12}TiO_{20}$ family of sillenites of arbitrary section are presented. The optimal crystalline cuts were determined in which the highest diffraction efficiency of holograms can be achieved.

Большинство параметров кристалла BTO, использованных в расчетах, соответствовали параметрам, приведенным в [1].

Графики зависимости дифракционной эффективности η голограмм, записанных в кристаллических пластинках BTO толщиной $d = 7.7$ мм срезов $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$ от ориентационного угла θ представлены на рис. 1. Здесь сплошной, штриховой, штрихпунктирной и пунктирной

серыми линиями изображены функции η(θ) для азимутов линейной поляризации Ψ_0, равных 0, 45, 90 и 135 ° соответственно.

Из рис. 1*а* и 1*б* можно сделать вывод, что при d = 7.7 мм в кристаллах срезов {110} и {112} могут быть достигнуты одинаковые максимально возможные значения дифракционной эффективности η^{max} голограмм, равные 1.83 %. При этом в кристалле среза {110} они имеют место при двух ориентационных углах θ = 51 и 309 ° (точки А и В), а в кристалле среза {112} – только при θ = 180 ° (точка А). В случае среза {111} наибольшая эффективность дифракции η^{max} составляет лишь 0.82 %, но достигается уже при трёх углах θ =50, 170 и 290 ° (точки А, В и С), что следует из рис. 1*в*.

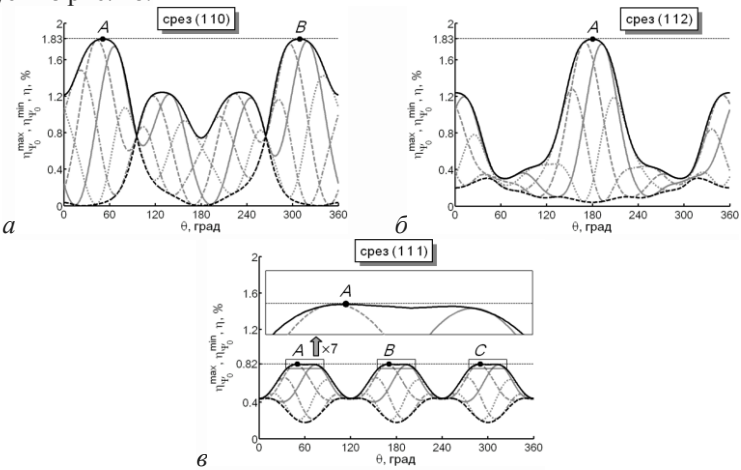


Рис. 1. Зависимости дифракционной эффективности голограмм, записанных в кристалле BTO с толщиной 7,7 мм, от ориентационного угла θ кристалла: для среза {110} (*а*), для среза {112} (*б*), для среза {111} (*в*); серые сплошная, штриховая, штрихпунктирная и пунктирная линии – зависимости η(θ) при Ψ_0 = 0, 45, 90 и 135 ° соответственно; черные сплошная и штриховая линии – соответствуют $\eta^{max}_{\Psi_0}(\theta)$ и $\eta^{min}_{\Psi_0}(\theta)$

Список литературы

1. Шепелевич В.В., Макаревич А.В., Шандаров С.М. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 22. С. 83.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. МОЛЧАНОВА[1], К.Н. БОЛДЫРЕВ[1,2]
[1]*Институт спектроскопии РАН, Троицк*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИОНОВ Co^{2+} В ОРТОБОРАТЕ КОБАЛЬТА $Co_3(BO_3)_2$

В работе представлены результаты экспериментального исследования и анализа спектров поглощения ортобората кобальта $Co_3(BO_3)_2$ в области электронных *d-d* переходов в ионах Co^{2+}. В спектрах наблюдаются интенсивные полосы поглощения, соответствующие разрешённым по спину переходам из основного состояния $^4T_1$ (^4F) на возбуждённые уровни. При температурах $T < 100$ K наблюдается богатая тонкая структура, связанная, по всей видимости, с бесфононными и вибронными переходами.

A.D. MOLCHANOVA[1], K.N. BOLDYREV[1,2]
[1]*Institute for spectroscopy of the RAS, Troitsk*
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

INVESTIGATION OF THE ABSORPTION SPECTRA OF Co^{2+} IONS IN COBALT ORTHOBORATE $Co_3(BO_3)_2$

The paper presents the results of experimental study and analysis of the absorption spectra of cobalt orthoborate $Co_3(BO_3)_2$ in the region of electronic *d-d* transitions in the Co^{2+} ions. Intense absorption bands corresponding to spin-allowed transitions from the ground state $^4T_1$ (^4F) to the excited levels was observed in the spectra. At temperatures $T < 100$ K rich fine structure was observed, most likely related to zero-phonon and vibronic transitions.

Ортоборат кобальта $Co_3(BO_3)_2$ кристаллизуется в центросимметричной ромбической пространственной группе *Pnnm* (#58) со структурой минерала котоита $Mg_3(BO_3)_2$ [1]. Ионы кобальта Co^{2+} в примитивной ячейке локализованы внутри кислородных октаэдров в двух неэквивалентных позициях: 2*a* и 4*f* (точечные группы симметрии C_{2h} и C_2, соответственно). В случае позиции 2*a* октаэдр [CoO_6] обладает центром симметрии, тогда как позиция 4*f* является нецентросимметричной. Две неэквивалентные позиции формируют две магнитных подсистемы

кобальта, причём обе подсистемы упорядочиваются антиферромагнитно при $T_N \approx 30$ K [2]. Ионы Co^{2+} имеют внешнюю электронную оболочку $3d^7$.

Ранее в работе [3] методами спектроскопических исследований и расчётов в рамках теории кристаллического поля (КП) с привлечением модели обменных зарядов были исследованы и охарактеризованы спектры поглощения изоструктурного ортоборату кобальта $Co_3(BO_3)_2$ ортобората никеля $Ni_3(BO_3)_2$ в области электронных d-d переходов в ионах Ni^{2+}. Широкие электронно-колебательные полосы поглощения были отнесены к переходам из основного состояния $^3A_{2g}(^3F)$ ионов никеля Ni^{2+} (преимущественно, в нецентросимметричных позициях 4*f*) на подуровни орбитальных триплетов $^3T_{2g}(^3F)$, $^3T_{1g}(^3F)$ и $^3T_{1g}(^3P)$. Кроме того, расчёт позволил получить физически обоснованные параметры КП и сопоставить наблюдаемые узкие линии в спектрах конкретным электронным переходам в ионах Ni^{2+} в обеих кристаллографических позициях.

В настоящей работе изучаются спектры оптического поглощения ортобората кобальта $Co_3(BO_3)_2$. В спектрах (частотный диапазон 4000 - 20000 см$^{-1}$) наблюдаются интенсивные полосы, которые, обратившись к энергетическим диаграммам (см., например, [4]), можно отнести к разрешённым по спину (S = 3/2) переходам из основного орбитального триплета $^4T_1$ (^4F) на возбуждённые уровни $^4T_2$ (^4F), $^4A_2$ (^4F) и $^4T_1$ (^4P). Кроме того, некоторые линии в низкочастотной области спектра (< 2000 см$^{-1}$), по всей видимости, относятся к переходам между компонентами $^4T_1$ (^4F). Ниже температуры 100 K в спектрах наблюдается большое количество узких полос, которые можно сопоставить бесфононным и вибронным переходам. Некоторые линии при температуре магнитного фазового перехода расщепляются, что может быть связано с обменным расщеплением при магнитном упорядочении подсистемы кобальта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00763 мол_а.

Список литературы

1. Berger S.V. // Acta Chem. Scand. 1949. V. 3. P. 660-675.
2. Newnham R.E., Redman M.J., Santoro R.P. // Z. Kristallogr. 1965. V. 121. P. 418-424.
3. Молчанова А.Д. // Физика твёрдого тела. 2018. Т. 60(10). С. 1916-1923
4. Tanabe Y., Sugano S. // J. Phys. Soc. Jpn. 1954. V. 9. P. 766-779.

УДК 535(06)+004(06)

М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ, А.Л. ТОЛСТИК[1],
И.Н. АГИШЕВ[1], И.Г. ДАДЕНКОВ[1], Ю.Ф. КАРГИН[2]
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
[1]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[2]Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $Bi_{12}SiO_{20}$, ИНДУЦИРОВАННОГО КОГЕРЕНТНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ ДЛИНАМИ ВОЛН

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики оптического поглощения на длине волны 633 нм в нелегированном кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$, наблюдаемой при воздействии на него когерентным импульсным излучением с различными длинами волн из спектрального диапазона 590 - 610 нм.

M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV, A.L. TOLSTIK[1],
I.N. AGISHEV[1], I.G. DADENKOV[1], Yu.F. KARGIN[2]
Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
[1]Belarusian State University, Minsk, Belarus
[3]Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow

DYNAMICS OF LIGHT ABSORPTION IN A $Bi_{12}SiO_{20}$ CRYSTAL INDUCED BY COHERENT PULSE RADIATION WITH THE DIFFERENT WAVELENGTHS

We experimentally studied the dynamics of optical absorption at a wavelength of 633 nm in an undoped crystal $Bi_{12}SiO_{20}$ observed on exposure to coherent pulsed radiation with the different wavelengths in the spectral range of 590 - 610 nm.

Воздействие на кристаллы силленитов светом из видимой и ближней УФ области приводит к изменению их оптического поглощения (фотохромному эффекту) [1]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований динамики фотоиндуцированного поглощения света на длине волны 633 нм в нелегированном кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$ при его засветке импульсным излучением от параметрического генератора света (ПГС) с длинами волн λ_i в диапазоне от 590 до 610 нм.

В экспериментах использовался монокристаллический образец $Bi_{12}SiO_{20}$ толщиной 10,2 мм, засвечиваемый импульсами ПГС с длительностью около 10 нс и периодом повторения 10 Гц, с длиной волны

в спектральном диапазоне 590 - 610 нм и средней интенсивностью на входной грани кристалла ~ 260 мВт/см^2. С помощью pin-фотодиода осуществлялся мониторинг изменений пропускания образцом излучения с длиной волны 633 нм, интенсивность которого на входной грани кристалла составляла ~ 130 мВт/см^2.

Получено, что лазерное излучение с длиной волны, не превышающей значение 598 нм, вызывает рост поглощения на длине волны 633 нм. На рис. 1*а* представлена временная зависимость изменения напряжения на фотодиоде при облучении кристалла светом с длиной волны 598 нм. В момент времени t = 0,0002 с включалось излучение и происходило резкое уменьшение оптического пропускания. Далее наблюдалось уменьшение этих изменений, которые за время около 0,2 мс достигали стационарного значения. При воздействии излучения с λ = 599 нм вначале также наблюдалось затемнение кристалла, которое сменялось его колебательной релаксацией к начальному уровню на временном промежутке 6,8 - 12,3 мс (рис. 1*б*).

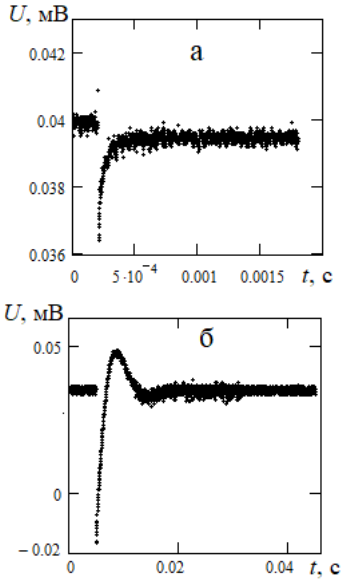


Рис. 1. Динамика изменения оптического пропускания света в кристалле $Bi_{12}SiO_{20}$ на длине волны 633 нм, индуцируемая импульсами с λ = 598 нм (а) и λ = 599 нм (б)

Таким образом, показано, что при воздействии на кристалл $Bi_{12}SiO_{20}$ когерентным излучением с длиной волны λ_i < 599 нм наблюдается увеличение его поглощения, а облучение светом с λ_I = 599 нм не приводит к стационарным фотоиндуцированным изменениям его пропускания.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017-2019 годы (№ 3.8898.2017/8.9) и РФФИ (Проект № 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Малиновский В.К., Гудаев О.А., Гусев В.А., Деменко С.И. Фотоиндуцированные явления в силленитах. Новосибирск. Наука. 1990.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, Н.Я. ВАЙСБУРГ
Тверской государственный университет

ОПТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ ПАРАТЕЛЛУРИТА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Получены коноскопические картины для различных областей оптических элементов акустооптических устройств, как в выключенном состоянии, так и при различных параметрах акустической волны. Методом дифференциальной коноскопии выявлены оптические аномалии и проведен сравнительный анализ полученных изображений.

S.A. TRETIAKOV, I.A. KAPLUNOV, N.Ya. VAYSBURG
Tver State University

OPTICAL ANOMALIES IN ELEMENTS FROM PARATELLURITE AT EXPLOITATION OF DEVICES ON THEIR BASIS

Conoscopic patterns were obtained for different regions of optical elements of acousto-optic devices, both in the off state and at different acoustic wave parameters. Optical anomalies were revealed by the method of differential conoscopy. A comparative analysis of acquired images was conducted.

Оптические аномалии – обобщающий термин, для описания разнообразных неоднородностей и структурных дефектов в кристаллах, применяемых в оптике, оптоэлектронике и лазерной технике [1, 2]. В указанных работах даётся удобное и достаточно общее определение ОА как любого нарушения оптической индикатрисы кристалла. Очевидно, что в этом определении по умолчанию предполагается, что такие нарушения оптической индикатрисы кристалла должны быть настолько существенными, чтобы их можно было обнаружить экспериментально.

В акустооптических дефлекторах оптические аномалии приводят к уменьшению эффективности дифракции и числа разрешаемых в пространстве позиций лазерного луча, уменьшают его интенсивность за счёт рассеяния и поглощения во внутренних объемах светозвукопровода, снижают дальность действия устройств. В акустооптических процессорах оптические аномалии уменьшают чувствительность устройств по радиочастоте, чем снижают эффективность обработки и анализа слабых

радиосигналов на фоне помех. В акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах они приводят к уменьшению спектрального разрешения, к искажениям фильтруемых изображений, к снижению быстродействия этих устройств.

Также оптические аномалии проявляются в кристаллах, используемых в акустооптических устройствах, в результате механических напряжений, возникающих при резке, шлифовке и полировки элементов, вследствие процессов неравномерного нагрева элемента при поглощении акустической и оптической волн, при диффузии атомов связующего слоя между оптическим кристаллом и пьезопреобразователем.

Цель работы являлось исследование методом дифференциальной коноскопии различных областей светозвукопровода акустооптических устройств на основе кристаллов парателлурита для выявления наведённых оптических аномалий и их численной оценки.

Метод дифференциальной коноскопии заключается в попиксельном вычитании изображений изохром по параметрам RGB (рис. 1). Представлены результаты исследований оптической однородности объемом при боковых гранях в сравнении с центральной частью кристалла при выключенных акустооптических устройствах и сравнения коноскопические картины, полученные при нагреве элементов при различных параметрах звуковой волны.

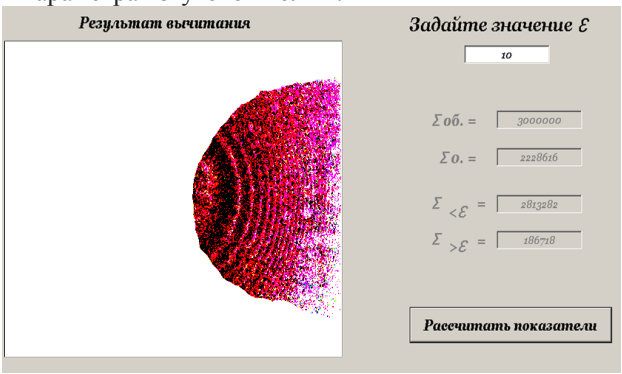


Рис. 1. Результат вычитания коноскопических картин, полученных в области пьезопреобразователя и в области, соответствующей центру кристалла

Список литературы

1. Punin Yu.O., Stuckenberg A.G. Anomalous Crystal Optics of Heterogeneous Crystals. // Crystallography Reports. 2004. V. 50. № 2. P. 297-307.

2. Shtukenberg A., Punin Y.O., Kahr B. Optically Anomalous Crystals. New York: Springer, 2007.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. КЛИМИН, М. ЧУ[1], М.Н. ПОПОВА
Институт спектроскопии РАН, Троицк
[1]Национальный университет Сунь Ят-Сена, Гаосюн, Тайвань

ИНФРАКРАСНЫЕ МУЛЬТИПЛЕТЫ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЛИНИЙ ИОНА Pr^{3+} В ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ YPO_4

Исследованы поляризованные спектры пропускания кристалла YPO_4:Pr в средней ИК-области для мультиплетов иона Pr^{3+}. Получена расширенная схема штарковских уровней, необходимая для уточнения расчета в рамках теории кристаллического поля. Обнаружена тонкая структура линий поглощения, обсуждается ее природа.

S.A. KLIMIN, M.C. CHOU[1], M.N. POPOVA
Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[1]National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung, Taiwan

INFRARED MULTIPLETS AND FINE STRUCTURE OF Pr^{3+} LINES IN DOPED YPO_4

Middle-IR multiplets of the Pr^{3+} ion in doped YPO_4 single crystals are studied for the first time by means of the polarized transmission spectroscopy. Energy scheme of the crystal-field (CF) levels was obtained, which is necessary for the clarification of the calculation in the frame of the CF theory. Fine structure of the spectral lines was observed, its nature is discussed.

Ортофосфаты со структурой циркона, представителем которых является кристалл YPO_4, обладают уникальными свойствами и находят применение технике. В частности при легировании редкоземельными (РЗ) элементами они могут быть использованы для генерации лазерного излучения [1] и являются перспективными для применений в квантовой информатике [2]. Для последнего из применений важна информация об энергетических состояниях иона, включая структуру штарковских и сверхтонких уровней. Такая информация для кристалла YPO_4:Pr является неполной, либо отсутствующей. В частности, штарковская труктура была ранее исследована только в ограниченном спектральном интервале [3]. В данной работе впервые исследованы спектры пропускания в средней ИК-области спектра, обусловленные f-f переходами иона Pr^{3+} в легированном кристалле YPO_4.

Спектры пропускания в поляризованном свете и их температурные зависимости были измерены с помощью фурье-спектрометра высокого разрешения IFS125HR фирмы Bruker и оптического криостата Cryomech PT403.

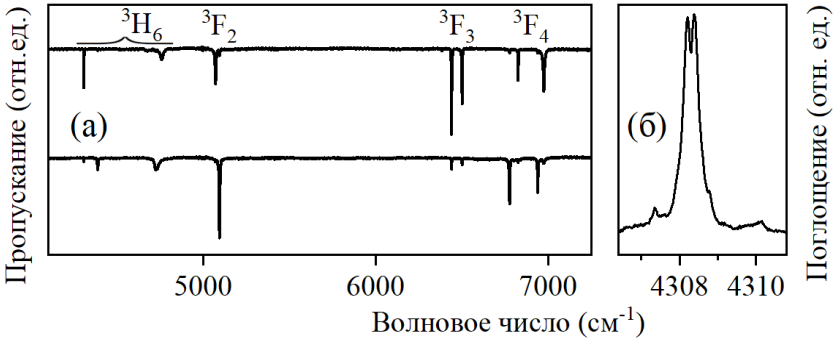


Рис. 1. Поляризованные спектры поглощения кристалла YPO_4:Pr (а), тонкая структура первой линии мультиплета $^3H_6$ иона Pr^{3+}(б), температура 5 К

Спектры пропускания при температуре 5 К для мультиплетов $^3H_6$, $^3F_{2-4}$ показаны на рис. 1а в двух поляризациях. Используя также спектры, измеренные при различных температурах, мы смогли построить схему штарковских уровней иона Pr^{3+} в кристалле YPO_4. Данная информация необходима для уточнения расчета в рамках теории кристаллического поля и дальнейшего расчета сверхтонких расщеплений. На рис. 1б представлена самая низкочастотная линия мультиплета $^3H_6$. Центральный интенсивный пик имеет форму линии с провалом посредине и широкими крыльями, характерную для спектральных переходов, подверженных сильному влиянию случайных деформаций [4]. Следует отметить, что подобные линии уже наблюдались для кристалла YPO_4:Tm [5]. Что касается других пиков, отстоящих от центрального на величины порядка 1 см$^{-1}$ и более, они, вероятно, принадлежат парным центрам празеодима (например, [6]).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-52-52001).

Список литературы

1. Yang L. et. al. // Opt. Mater. Express. 2019. V. 7. P. 3618-3625.
2. Popova M.N. et. al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 235151.
3. Moune O.K. et. al. // J. Alloys Comp. 2001. V. 323-324. P. 783-787.
4. Klimin S.A. et. al. // Phys. Rev. B. 2010. V. 81 P. 045113.
5. Malkin B.Z. et. al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96 P. 014116.
6. Pytalev D.S. et. al. // Phys. Lett. A. 2008. V. 372 P. 506-3509.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. НЕКРАСОВ, В.С. КРИВОБОК[1], М.М. УНТУРА
МИРЭА – Российский технологический университет
[1]Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСОВ АНИОННЫХ ЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

Разработаны методы синтеза нанокристаллов металлокомплексов анионных цианиновых красителей и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства. Установлено, что наряду с максимумом резонансной экситонной люминесценции со стоксовым сдвигом 10 ÷ 15 нм с временем затухания фотолюминесценции ~ 0.1 нс, наблюдается второй максимум люминесценции со стоксовым сдвигом 50 ÷ 150 нм и временем затухания люминесценции 1 ÷ 10 нс.

A.D. NEKRASOV, V.S. KRIVOBOK[1], M.M. UNTURA
MIREA – Russian Technological University
[1]Lebedev Physics Institute of the RAS, Moscow

LUMINESCENT NANOCRYSTALS OF METAL COMPLEXES OF ANIONIC CYANINE DYES

Methods for the synthesis of nanocrystals of metal complexes of anionic cyanine dyes have been developed and their spectral-luminescent properties have been investigated. It was found that, along with the maximum of resonant exciton luminescence with a Stokes shift of 10 ÷ 15 nm with a photoluminescence decay time of ~ 0.1 ns, a second luminescence maximum with a Stokes shift of 50 ÷ 150 nm and a luminescence decay time of 1 ÷ 10 ns is observed.

Существенное значение для развития оптических методов обработки информации приобретают анизотропные органические нанокристаллы из цианиновых красителей. Высокий коэффициент поглощения света экситонных переходов (~ 10^5 см$^{-1}$) и высокий квантовый выход генерации молекулярных экситонов Френкеля при фотовозбуждении делает экситонные молекулярные кристаллы цианиновых красителей перспективными в качестве приемников и источников оптического излучения. В работе были исследованы условия синтеза и управляемой кристаллизации металло-комплексных нанокристаллов анионных цианиновых красителей в водных и водно-спиртовых растворах.

Были синтезированы нанокристаллы анионных красителей тиамонометинцианинов, хиномонометинцианинов, оксатриметинцианинов и имидакарбоцианинов, содержащих сульфопропильные группы, с многозарядными катионами металлов (Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+}, Bi^{3+}, Fe^{3+}, Sm3+, Nd^{3+}, Yb^{3}+, Eu^{3+}, Gd^{3+}, Th^{4+}) и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства. Измерения спектров люминесценции слоев нанокристаллов металлокомплексов красителей показали, что в ряде случаев наблюдается два максимума люминесценции – наряду с максимумом резонансной люминесценции с максимумом с малым стоксовым сдвигом (10 - 15 нм) присутствует дополнительный максимум люминесценции со стоксовым сдвигом 50 - 150 нм. При этом, соотношение интенсивностей этих максимумов люминесценции зависит от исходной структуры красителя, катиона металла и условий синтеза кристаллов (температуры, скорости перемешивания раствора), типа растворителя. При этом, в случае катионов, проявляющих заметные окислительные свойства (Cu^{2+}, Fe^{3+}) интенсивность люминесценции второй полосы существенно меньше, что может быть связано с обратимым переносом фотовозбужденного электрона от J-агрегата красителя на катион металла. Высказано предположение, что преимущественный вклад в длинноволновую люминесценцию J-нанокристаллов могут вносить поверхностные дефекты структуры нанокристалла или адсорбированные на поверхности H-димеры, являющиеся экситонными ловушками. Заметные величины стоксовых сдвигов и длительные времена затухания длиноволнового максимума фотолюминесценции вероятно обусловлены захватом экситонов на ловушках с последующим образованием экситонов с переносом заряда («CT-экситонов») и их последующей излучательной рекомбинацией, что может быть использовано при создании источников излучения на основе молекулярных кристалов органических красителей.

Сделан вывод, что нанокристаллы металлокомплексов цианиновых красителей представляют интерес в качестве люминесцирующих материалов в органической фотонике.

Список литературы

1. Shapiro B.I., Nekrasov A.D., Krivobok V.S. et. al. // Optics Express. 2018. V. 26. № 23. P. 30324-3033717.

2. Sorokin A.V. et. al. // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. № 49. P. 27865-27873.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. СТРОКОВА, В.Б. КАРПОВ, А.М. САЛЕЦКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ В ОДНОМЕРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Приведены результаты теоретического расчета и экспериментального измерения для спектров люминесценции и поглощения органических красителей в матрице одномерного полимерного фотонного кристалла. Дано объяснение модифицирования спектральных свойств молекул в матрице фотонного кристалла в терминах локальной плотности электромагнитных мод.

Yu.A. STROKOVA, V.B. KARPOV, A.M. SALETSKY
Lomonosov Moscow State University

MODIFIED SPECTRAL PROPERTIES OF ORGANIC DYES IN ONE-DIMENSIONAL POLYMERIC PHOTONIC CRYSTALS

The results of theoretical evaluation and experimental measuring of luminescence and absorbance spectra of organic dyes in one-dimensional polymeric photonic crystal are presented. The explanation of molecular spectral properties modification in photonic crystal matrix is given in terms of local density of electromagnetic states.

Одномерные полимерные фотонные кристаллы (ФК) представляют собой перспективную матрицу с точки зрения изменения спектральных свойств молекул. К достоинствам таких ФК можно отнести простоту изготовления и возможность получения структур с заданными свойствами.

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование модифицированных спектральных свойств молекул в матрице одномерного ФК. ФК, используемые в работе, представляют собой структуру из чередующихся полимерных пленок (полимеры: поливинил карбазол (PVK) и целлюлозы ацетат(CA)), которые были последовательно нанесены на подложку методом центрифугирования. ФК изготавливались согласно методике, описанной в работе [1].

В отличие от ФК на основе мезопористого кварца [2, 3] полимерные ФК позволяют внедрять краситель выборочно в слои с высоким или низким показателем преломления, а также выбирать координату, на которой будет находиться допированный красителем слой. В связи с этим

становится возможным проследить зависимость усиления или ослабления испускания и поглощения молекул от координаты внутри ФК.

На рис. 1 и 2 приведены расчетные зависимости показателя отражения ФК от длины волны при различных толщинах слоев и усредненная по направлению диполя молекулы локальная плотность распространяющихся электромагнитных мод при различных координатах z в направлении стратификации.

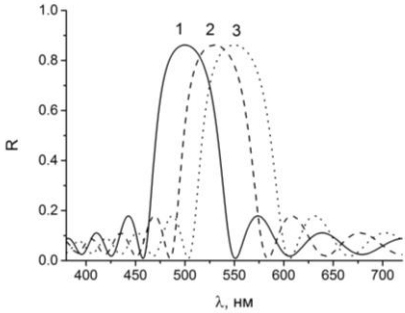


Рис. 1. Зависимость показателя отражения ФК от длины волны, параметры расчета: толщина слоя PVK 74.3 нм, толщина слоя CA 84.7 нм (1); толщина слоя PVK 78.7 нм, толщина слоя CA 89.8 нм (2); толщина слоя PVK 81.7 нм, толщина слоя CA 93.2 нм (3), показатели преломления PVK 1.683, CA – 1.475; число периодов 10

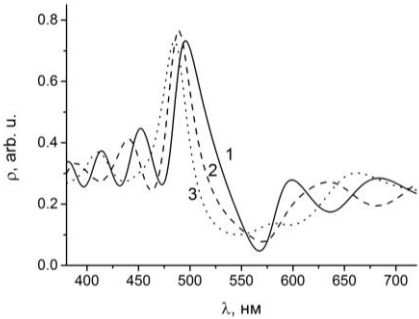


Рис. 2. Зависимость локальной плотности распространяющихся электромагнитных мод от длины волны, параметры расчета: координата z – 39.3 нм (1), 376.3 нм (2), 713.1 нм (3), толщина слоя PVK 78.7 нм, толщина слоя CA 89.8 нм

Список литературы

1. Scotognella F., Monguzzi A. et. al. // International Journal of Photoenergy. 2008. V. 2008. P. 389034.

2. Строкова Ю.А., Свяховский С.Е., Салецкий А.М. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125(8). С. 200-203.

3. Строкова Ю.А., Свяховский С.Е., Салецкий А.М. // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85(6). С. 886-890.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. КЛИМИН, Е.С. КУЗНЕЦОВА[1], П.С. БЕРДОНОСОВ[1]
Институт спектроскопии РАН, Троицк
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$: СПЕКТРОСКОПИЯ КРАМЕРСОВСКИХ ДУБЛЕТОВ

Исследовано магнитное упорядочение кристалла $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$ из семейства 2D фрустрированных магнетиков со структурой франциситa по низкотемпературным оптическим спектрам пропускания. При температуре 38 К обнаружено расщепление спектральных линий *f-f* переходов в ионе диспрозия, связанное со снятием крамерсовского вырождения внутренним магнитным полем. Функция расщепления основного крамерсовского дублета от температуры была использована для моделирования низкотемпературных особенностей термодинамических функций, обусловленных вкладом редкоземельного иона.

S.A. KLIMIN, E.S. KUZNETSOVA[1], P.S. BERDONOSOV[1]
Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk
[1]*Lomonosov Moscow State University*

MAGNETIC ORDERING OF $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$: SPECTROSCOPY OF KRAMERS DOUBLETS

Magnetic ordering of $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$, the representative of the family of the 2D frustrated magnets with the francisite crystal structure, was studied by means of low-temperature optical transmission spectroscopy. At temperature 38 K the splittings of spectral lines belonging to *f-f* transtions in Dy^{3+} ion was detected due to the release of the Kramers degeneracy in the internal magnetic field arising in the ordered state. The temperature function of the splitting of the ground Kramers doublet was extrapolated and used for calculation of the low-temperature peculiarities of the thermodynamic functions due to the contribution of the rare-earth ion.

Семейство редкоземельных (РЗ) франциситов $Cu_3R(SeO_3)_2O_2Cl$ (*R*-РЗ элемент) со структурой природного минерала $Cu_3Bi(SeO_3)_2O_2Cl$ [1] было впервые синтезировано в 2008 г. [2]. Они интересны своими магнитными свойствами. Ионы меди образуют гофрированные плоскости с деформированной решеткой кагоме, в результате франциситкласифицируется как двумерный фрустрированный магнетик, в котором возможно существование перехода Костерлица-Таулесса [3]. Замена висмута на магнитный РЗ ион приводит к взаимодействию двух магнитных подсистем и появлению спин-переориентационных переходов

[4-7]. Спектроскопия крамерсовых ионов была успешно применена для исследования ряда франциситов (R = Sm [4], Yb [5], Nd [6]. В данной работе впервые проводится спектроскопическое исследование диспрозиевого францисита $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$.

Спектры пропускания таблетки $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$+KBr, были измерены на фурье-спектрометре BRUKER IFS125. Охлаждение осуществлялось при помощи криостата CRYOMECH PT403. На рис. 1 показаны изменения с температурой линии поглощения, отнесенной к переходу на нижайший по энергии уровень мультиплета $^6H_{13/2}$ иона Dy^{3+}.

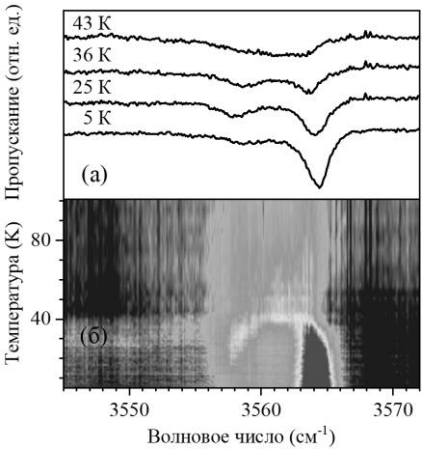


Рис. 1. Спектры пропускания в области самой низкочастотной линии мультиплета $^6H_{13/2}$ иона Dy^{3+} при различных температурах(а), карта интенсивностей (б)

При температуре T_N = 38 K происходит расщепление линии, связанное с установлением в кристалле магнитного порядка (при близких температурах происходит антиферромагнитное упорядочение и в других РЗ франциситах [4-7]). Ниже температуры T_N в кристалле возникает внутренне эффективное магнитное поле, снимающее крамерсово вырождение электронных уровней иона Dy^{3+}. Анализ измеренных температурнозависимых спектров позволил построить функцию расщепления основного крамерсовского дублета в зависимости от температуры. Эта функция была использована для расчета вклада РЗ иона в магнитную восприимчивость и теплоемкость $Cu_3Dy(SeO_3)_2O_2Cl$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 19-02-00251).

Список литературы

1. Pring A. et al. // Amer. Miner. 1990. V. 75. P. 1421.
2. Berdonosov P.S., Dolgikh V.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2008. V. 53. P. 1353.
3. Pregelj M. et. al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 144409.
4. Zakharov K.V. et. al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. P. 054401.
5. Markina M.M. et. al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. P. 134422.
6. Klimin S.A., Budkin I.V. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 132. P. 02010.
7. Markina M.M. et al. // JMMM 2019. V. 492. P. 165721.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. ГРИЩЕНКО[1], Ю.С. СТИРМАНОВ[2], А.В. КОНЯШКИН[1,2], О.А. РЯБУШКИН[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ИСЛЕДОВАНИЕ РАЗОГРЕВА КРИСТАЛЛА ТРИБОРАТА ЛИТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1070 нм

Представлены результаты экспериментов по измерению разогрева, коэффициентов оптического поглощения и теплообмена с окружающим воздухом нелинейно-оптического кристалла трибората лития при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности на длине волны 1070 нм.

I.V. GRISHCHENKO[1], Yu.S. STIRMANOV[2], A.V. KONYASHKIN[1,2], O.A. RYABUSHKIN[1,2]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
[2]Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

INVESTIGATION OF HEATING OF LITHIUM TRIBORATE CRYSTAL INTERACTING WITH HIGH INTENSITY LASER RADIATION AT 1070 nm WAVELENGTH

The heating of nonlinear-optical lithium triborate crystal and its optical absorption and heat exchange coefficients were measured for different incident laser radiation intensities at 1070 nm wavelength.

Известно, что прямая генерация лазерного излучения возможна в довольно узких спектральных диапазонах. Излучение на новых длинах волн можно получить за счет нелинейного преобразования частоты лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах. Эффективность нелинейного преобразования определяется условиями фазового синхронизма, которые, в частности, зависят от температуры. В случае воздействия высокоинтенсивного лазерного излучения даже малое оптическое поглощение может приводить не только к существенному разогреву кристаллов и нарушению условий фазового синхронизма, но также к образованию дефектов и оптическому разрушению кристаллов.

Целью данной работы является исследование процесса разогрева и измерение абсолютных значений коэффициентов оптического поглощения и теплообмена с окружающим воздухом кристалла трибората лития (LBO) при взаимодействии с непрерывным излучением волоконного одномодового иттербиевого лазера с длиной волны 1070 нм и максимальной мощностью до 500 Вт.

Упрощенная схема экспериментальной установки для проведения исследований методом пьезорезонансной лазерной калориметрии (ПРЛК) [1] представлена на рис. 1. Исследуемый образец кристалла LBO помещался между двумя тонкими медными электродами, образующими конденсатор, который подключался в электрическую цепь, содержащую нагрузочное сопротивление R и радиочастотный генератор. Напряжение на нагрузочном сопротивлении измерялось с помощью синхронного детектора. Коэффициенты оптического поглощения α и теплообмена h^T кристалла LBO с воздухом определялись из аппроксимации кинетик его разогрева лазерным излучением, полученных на основе измерения индуцированного сдвига частот пьезоэлектрических резонансов LBO, калиброванных по температуре в условиях однородного разогрева [1]. В диапазоне интенсивностей от 10 МВт/см^2 до 100 МВт/см^2 в пределах ошибки измерений коэффициенты не изменяются и составляют величины: $\alpha = (2{,}9 \pm 0{,}7)\cdot 10^{-4}$ см$^{-1}$ и $h^T = (33 \pm 6)$ Вт/(м^2 ° С). Измеренная зависимость коэффициента α приведена на рис. 2.

В работе была продемонстрирована возможность применения метода ПРЛК для измерения малых коэффициентов оптического поглощения кристаллов при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности.

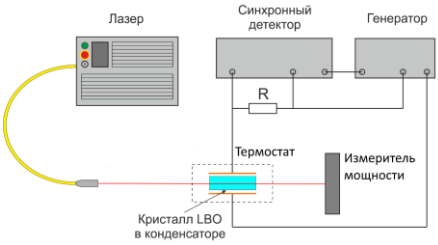


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

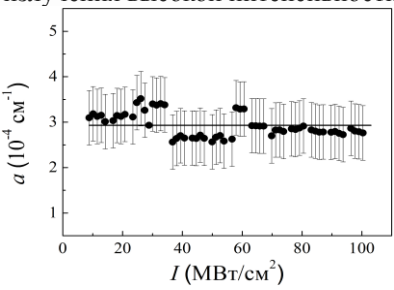


Рис. 2. Зависимость коэффициента оптического поглощения LBO от интенсивности лазерного излучения

Список литературы

1. Pigarev A.V., et. al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9894. P. 98941.

УДК 535(06)+004(06)

И.А. БУДАГОВСКИЙ[1], А.С. ЗОЛОТЬКО[1], А.А. КУЗНЕЦОВ[1], М.П. СМАЕВ[1,2], С.А. ШВЕЦОВ[1,3], А.Ю. БОБРОВСКИЙ[3], Н.И. БОЙКО[3], В.П. ШИБАЕВ[3]

[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*
[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ОБРАТИМАЯ ЗАПИСЬ СВЕТОИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДИРЕКТОРА В НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ПОЛИМЕРЕ С МЕЗОГЕННЫМИ БОКОВЫМИ ФРАГМЕНТАМИ, ЛЕГИРОВАННОМ КРАСИТЕЛЕМ

Были сформированы и записаны фазовые структуры в 50-мкм слое нематического жидкокристаллического полимера с мезогенными боковыми фрагментами, легированного азокрасителем. Записанные деформации поля директора были индуцированы близкой к TEM_{01} лазерной модой и исследованы в непороговой геометрии взаимодействия светового пучка с жидкокристаллическим полимером.

I.A. BUDAGOVSKY[1], A.S. ZOLOT'KO[1], A.A. KUZNETSOV[1], M.P. SMAYEV[1,2], S.A. SHVETSOV[1,3], A.Yu. BOBROVSKY[3], N.I. BOIKO[3], V.P. SHIBAEV[3]

[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*
[3]*Lomonosov Moscow State University*

REVERSIBLE RECORDING OF THE LIGHT-INDUCED DIRECTOR DEFORMATION IN DOPED SIDE-CHAIN NEMATIC LIQUID-CRYSTALLINE POLYMER

The phase structures were generated and recorded in the 50-μm layer of a nematic liquid-crystalline side-chain polymer doped with azodye. The stored deformations of the director field were induced by the laser mode close to TEM_{01} and studied for different geometries of light beam–polymer interaction.

Жидкие кристаллы являются средами с огромной оптической нелинейностью. С помощью внешних полей можно управлять ориентацией молекул жидкого кристалла и индуцировать значительные изменения показателя преломления. В нематических

жидкокристаллических полимерах (НЖКП) это изменение может быть сохранено при охлаждении в стеклообразную фазу.

В данной работе записана деформация поля директора (вектора, характеризующего преимущественную ориентацию молекул) в НЖКП, легированном красителем, при непороговой геометрии взаимодействия света и директора, которая реализуется в случае наклонного падения света на ячейку (угол падения составлял 35 °). Отсутствие порога перехода значительно ускоряет светоиндуцированную ориентацию и процесс формирования фазовых структур. Для записи фазовых структур использовали пучок непрерывного лазера (532 нм) с двумя одинаковыми пиками, близкий к моде TEM_{01} (рис. 1*а*).

При малом масштабе записываемых объектов на деформацию поля директора значительно влияют упругие силы, ограничивая минимальное разрешение на уровне порядка толщины слоя НЖКП (50 мкм). Разрешение оценивали по глубине фазовой модуляции между пиками интенсивности пучка. При расстоянии между пиками в 20 мкм глубина модуляции составила величину порядка 2π (рис. 1*б*). При увеличении размеров пучка реализуется случай локального приближения, когда поперечные упругие силы почти не влияют на распределение директора и профиль изменения фазы близок к профилю интенсивности пучка (рис. 1*в*). При повторном нагреве образца до нематической фазы индуцированные структуры полностью релаксируют, что свидетельствует об обратимости процесса записи.

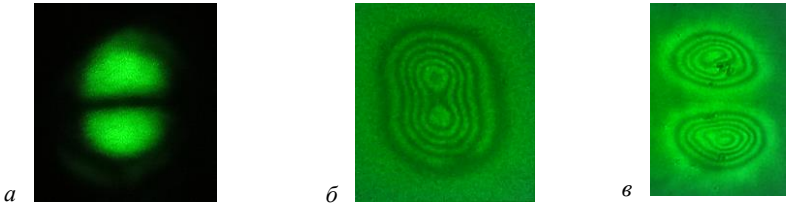


Рис. 1. Распределение интенсивности записываемого пучка в дальней зоне (*а*) и микрофотографии в скрещенных поляризаторах записанной фазовой структуры, расстояние между пиками 20 мкм (*б*) и 120 мкм (*в*)

Эффект записи фазовых структур может быть использован для формирования поляризационно-чувствительных микролинз, волноводов и других модуляторов волнового фронта в тонких полимерных слоях.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 18-02-00986-а.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КНЯЗЬКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНКА ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ОТРАЖЕНИЮ ДВУХ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЛУЧЕЙ СВЕТА

Приведены результаты оценки двулучепреломления напряженных материалов по величине разности коэффициентов отражения ортогонально линейно поляризованных световых волн. На примере кристаллического кварца показана применимость отражательного метода для оценки двулучепреломления. Обсуждаются результаты оценки двулучепреломления поверхности кварцевой заготовки световода с упрочняющим титано-силикатным покрытием.

A.V. KNIAZKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

BIREFRINGENCE ESTIMATION OF STRESSED MATERIALS BY REFLECTION OF TWO ORTHOGONALLY POLARIZED LIGHT BEAMS

Presents the results of a method for birefringence estimation of stressed materials by the value of the reflection coefficients difference of the orthogonally linearly polarized light waves. The applicability of the reflective method for birefringence estimation is shown on the example of crystalline quartz. The results of birefringence estimation of a quartz fiber blank surface with reinforcing titanium-silicate coating is discussed.

Двулучепреломление в материалах может быть вызвано механическим напряжением, которое деформирует изотропные материалы. Изотропный материал становится оптически анизотропным с двулучепреломлением. Величина такого наведенного двулучепреломления может использоваться для оценки механического стресса. Для изучения механического стресса в прозрачных материалах наиболее часто используются поляризационно-оптические свето-пропускающие методы [1]. Недавно нами был предложен отражательный метод поляризационно-модулированного светового пучка для оценки электрооптических коэффициентов материалов [2] по разности коэффициентов отражения ортогонально поляризованного светового пучка и для оценки механических напряжений по измерению индуцированного напряжением двулучепреломления [3].

В настоящей работе обсуждается двух пучковый отражательный метод с ортогонально поляризованных пучками.

Наведенное стрессом двулучепреломление Δn определяется разностью коэффициентов отражений ортогонально поляризованных световых волн $\Delta R = R_e - R_o$:

$$\Delta n = \Delta R \frac{(n+1)^3}{4(n-1)}.$$

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки для оценки двулучепреломления. Полупроводниковый лазер имел возможность поворачивался вокруг оси для получения равной интенсивности ортогонально поляризованных пучков на выходе призмы Номарского. Эти пучки нормально падают на образец и отражаются, далее, проходя призму Глана-Томпсона, разделяются и попадают на фотодетекторы, сигналы которых поступают на инструментальный усилитель с периодически изменяемым коэффициентом усиления.

Метод испытывался на образцах кристаллического кварца с $\Delta n = 0.009$. Усредненные результаты измерений дали $\Delta n = 0.0087$. Двулучепреломление поверхности заготовки световода с упрочняющим титано-силикатным покрытием оценено как $\Delta n = 0.0032$. Таким образом, продемонстрирован отражательный двух пучковый метод оценки Δn.

Следует отметить, что этот метод работает как для прозрачных, так и для непрозрачных материалов.

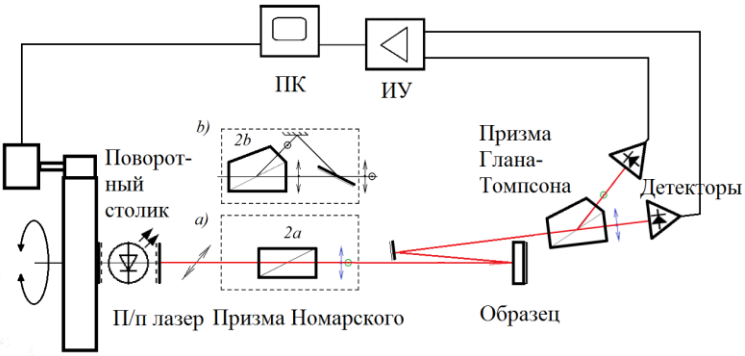


Рис. 1. Экспериментальная установка

Список литературы

1. Frocht M.M. Photoelasticity. New York: Wiley, 1941. V. 1.
2. Kniazkov A.V. // Appl. Phys. B. 2015. V. 118. P. 231.
3. Князьков А.В. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 2. С. 346-348.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. АНИКЬЕВ, М.Ф. УМАРОВ[1], Э.Н. АНИКЬЕВА[2]
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[1]Вологодский государственный университет
[2]Мичуринский государственный аграрный университет, Тамбовская обл.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА ПОЛЯРИТОНАХ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ С ДЕФЕКТАМИ СТЕХИОМЕТРИИ

Проведены расчеты эффективного сечения рассеяния света на поляритонах полно-симметричных колебаний в конгруэнтных кристаллах ниобата лития. При учете взаимодействия оптических фононов с акустическими через затухание, вызванное релаксацией акустических фононов на дефектах, рассчитан спектр рассеяния света на поляритонах при малых углах рассеяния в приближении когерентного потенциала.

A.A. ANIKIEV, M.F. UMAROV[1], E.N. ANIKIEVA[2]
Bauman Moscow State Technical University
[1]Vologda State University
[3]Michurinsk State Agrarian University, Tambov region

LIGHT SCATTERING BY POLARITONS IN FERROELECTRICS WITH STECHIOMETRIC DEFECTS

The effective cross section for light scattering by polaritons of completely symmetric vibrations in congruent lithium niobate crystals was calculated. By taking into account the interaction of optical phonons with acoustic ones through the attenuation caused by relaxation of acoustic phonons at defects, the spectrum of light scattering by polaritons at small scattering angles is calculated in the coherent potential approximation

Последние исследования акустического поглощения в конгруэнтных кристаллах ниобата лития показали существенную зависимость плотности образования дефектов стехиометрии от условий и технологии выращивания [1]. В низкочастотных спектрах комбинационного рассеяния и квазиупругого рассеяния света проявляются особенности плотности состояний акустических фононов, связанные с нарушением правил отбора по волновому вектору в несовершенных кристаллах. При этом наблюдается существенное уширение линий рассеяния света на полно-симметричных колебаниях оптических фононов, прямо зависящее от концентрации дефектов. Особый интерес в связи с изучением роли

дефектов в квазиупругом рассеянии, представляет изучение ширины линий связанных фонон-фотонных возбуждений при малых передачах импульса, когда в ширину линии вносят вклад процессы взаимодействия акустических и оптических фононов через время релаксации на дефектах.

Изменение дипольного момента сегнетоэлектрического кристалла вызвано тремя вкладами: смещением атомов в ячейке без центра симметрии, электрооптическим эффектом – поляризацией за счет оптической моды и зависимостью диэлектрической поляризуемости от поля при пьезоэффекте за счет акустических колебаний. Гамильтониан системы состоит из слагаемого, описывающего флуктуации электромагнитного поля в среде – поляритоны низкочастотной оптической ветви, поляритоны, связанные с акустическими колебаниями в пьезосреде и слагаемое описывающее ангармоническое взаимодействие оптических и акустических фононов в условиях нарушения правил отбора по волновому вектору из-за дефектов стехиометрии.

Расчеты эффективного сечения рассеяния на поляритонах были проведены на основе модельного закона дисперсии для низкочастотных оптических ветвей кристалла ниобата лития. Нормированная на бозе-фактор спектральная интенсивность рассеяния в зависимости от угла между векторами падающего и рассеянного света 0.1^{o} - 2.5^{o} (внутри кристалла) показала несимметричную форму линии поляритона, причем интенсивность рассеяния росла при уменьшении угла рассеяния.

С увеличением концентрации дефектов, ширина линии поляритонов на оптических фононах возрастала, в то же время ширина линии поляритонов на акустических фононах уменьшалась и становилась симметричной по мере уменьшения угла рассеяния. С уменьшением величины импульса передачи падающих фотонов среде интенсивность сечения рассеяния на поляритонах акустических фононов возрастала, что соответствует уменьшению фононного вклада в рассеяние. С ростом концентрации дефектов интенсивность рассеяния на поляритонах акустической ветви возрастала по экспоненциальному закону, у ширина линии уменьшалась по степенному закону. Результаты работы могут иметь определенный интерес с точки зрения оценки вклада дефектов в интенсивность рассеяния света на поляритонах в окрестности структурных фазовых переходов, где вопрос о происхождении центрального пика до сих пор является предметом дискуссий.

Список литературы

1. Anikiev A.A., Umarov M.F., Scott J.F. // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 115016.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. ГОРЕЛИК[1,2], А.Ю. ПЯТЫШЕВ[1]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

КОМБИНАЦИОННАЯ ОПАЛЕСЦЕНЦИЯ В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Приведены результаты экспериментальных исследований спектров комбинационного рассеяния света в области фазового перехода в сегнетоэлектрических кристаллах. Определены характеристики мягких мод при структурных фазовых переходах в кристаллах германата свинца, ниобата и танталата лития.

V.S. GORELIK[1,2], A.Yu. PYATYSHEV[1]
[1]*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*
[2]*Bauman Moscow State Technical University*

RAMAN OPALESCENCE IN THE REGION OF PHASE TRANSITION IN FERROELECTRIC CRYSTALS

The results of experimental studies of Raman spectra of light in the region of a phase transition in ferroelectric crystals are presented. The characteristics of soft modes in structural phase transitions in lead germanate, lithium niobate and tantalate crystals are determined.

Сегнетоэлектрические кристаллы характеризуются проявлением уникальных физических свойств, связанных с аномалиями диэлектрической проницаемости, пьезоэлектрического эффекта. При определённых условиях в этих кристаллах могут происходить структурные фазовые переходы, при которых наблюдаются аномалии этих свойств. Одним из явлений, наблюдавшихся в сегнетоэлектрических кристаллах в области структурных переходов является эффект опалесценции-резкого возрастания интенсивности рассеянного излучения.

Целью работы является установление характеристик решёточной комбинационной опалесценции в сегнетоэлектрических кристаллах. В качестве объектов исследования были выбраны кристаллы нитрита натрия, ниобата и танталата лития, германата свинца. Регистрация спектров комбинационного рассеяния (КР) проводилась при

поляризационной геометрии, соответствующей проявлению мягкой моды, ответственной за сегнетоэлектрический фазовый переход.

Спектры КР регистрировались при фиксированных температурах T ($I(\omega', T)$; $T = const$), а также при фиксированных частотах спектрометра ($I(\omega', T)$; $\omega' = \omega_0 - \Omega = const$), при медленном изменении температуры кристалла [1].

В результате установлено, что при приближении к точке сегнетоэлектрического фазового перехода обнаруживается эффект комбинационной опалесценции, состоящий в резком возрастании интенсивности сигнала КР на фиксированных частотах, вблизи возбуждающей линии. Наблюдаемые экспериментальные закономерности в изочастотных спектрах КР вблизи высокотемпературного фазового перехода в сегнетоэлектрических кристаллах сопоставлены с теоретическими зависимостями в рамках приближения одной (эффективной) мягкой моды. В результате оценены критические индексы сегнетоэлектрического фазового перехода и проанализированы условия проявления узкого центрального пика в результате взаимодействия эффективной мягкой моды с нефундаментальным низкочастотным возбуждением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты 18-02-00181 и 18-32-00259 мол_а).

Список литературы

1. Gorelik V. S., Pyatyshev A. Yu. // Journal of Raman Spectroscopy. 2019. V. 50 (10). P. 1584.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. МАМОНОВ, А.В. РАСПУТНЫЙ, Д.А. КОПЫЛОВ,
Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ОДНОМЕРНЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫНУЖДЕННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты численного моделирования генерации второй оптической гармоники от широкополосного излучения вынужденного параметрического рассеяния в одномерном микрорезонаторе.

E.A. MAMONOV, A.V. RASPUTNYI, D.A. KOPYLOV,
T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

STUDY OF SECOND HARMONIC GENERATION IN 1D MICRORESONATORS FROM HIGH-GAIN PARAMETRIC DOWN CONVERSION

We present the results of numerical study of second harmonic generation from broadband high-gain parametric down conversion in 1D photonic-crystal-based microresonators.

Нелинейно-оптические эффекты, возникающие при взаимодействии неклассического света с нелинейной средой, представляют интерес не только с точки зрения квантовой оптики, где с помощью нелинейно-оптических методов часто осуществляется генерация и детектирование неклассических полей [1], но и с точки зрения нелинейной и корреляционной спектроскопии [2]. Так при генерации оптических гармоник от флуктуирующего излучения накачки возможно наблюдение эффекта статистического выигрыша: интенсивность оптических гармоник будет выше от флуктуирующих источников накачки, по сравнению с когерентным источником накачки. При генерации второй гармоники в прозрачных нелинейных кристаллах величина статистического выигрыша равняется нормированной корреляционной функции второго порядка, что было экспериментально показано, например, для теплового света [3] и для излучения вынужденного параметрического рассеяния [4]. Тем не менее, при нелинейно-оптическом взаимодействии широкополосного излучения

с резонансной нелинейной средой статистический выигрыш будет зависеть от отношения спектральной ширины излучения накачки к ширине резонанса. Данный эффект был обнаружен при описании многофотонного поглощения от широкополосного теплового излучения [5]. В отличие от теплового излучения, излучение вынужденного параметрического рассеяния (ВПР) является неклассическим [6]. При этом в излучении ВПР присутствуют корреляции между различными спектральными компонентами, что приводит к флуктуациям интенсивности большим по сравнению с тепловым источником. Тем не менее, на сегодняшний день отсутствуют работы по изучению статистического выигрыша в резонансных нелинейных средах от излучения ВПР.

В данной работе рассматривается генерация второй гармоники в одномерном микрорезонаторе, который состоит из двух фотонных кристаллов и микрорезонаторного слоя с квадратичной нелинейной восприимчивостью. В работе представлены результаты численного моделирования спектров второй оптической гармоники от излучения ВПР, когда в среде присутствует резонанс на частоте второй гармоники.

Для описания свойств излучения ВПР использовался формализм частотных мод Шмидта [7], который позволяет учесть спектральную ширину корреляций излучения ВПР. Для расчёта спектров второй гармоники использовался метод матрицы распространения, расширенный на случай неклассических полей. В работе проанализированы спектры второй гармоники для разных спектральных ширин резонансов как от излучения ВПР, так и от теплового излучения, а также посчитаны величины статистического выигрыша.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-32-00710.

Список литературы

1. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980.
2. Dorfman K.E., Schlawin F., Mukamel S. // Reviews of Modern Physics. 2016. V. 88(4).
3. Qu Y., Singh S. // Optics Communications. 1992. V. 90 (1–3). P. 111-114.
4. Spasibko K.Y. et. al. // Physical Review Letters. 2017. V. 119. P. 223603.
5. Agarwal G.S. // Physical Review A. 1970. V. 1. P. 1445.
6. Chekhova M.V., Leuchs G., Żukowski M. // Optics Communications. 2015. V. 337.
7. Lemieux S. et. al. // Physical Review Letters. 2016. V. 117(18).

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. КОВАЛЕНКО[1], Г.А. АЛОЯН[1], Д.М. МУХАНЬКОВ[2],
Т.К. КАРПОВА[1], А.В. СМИРНОВ[1], О.А. РЯБУШКИН[1,2]
[1]*Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный
[2]*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники*
им. В.А. Котельникова РАН

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ГОНИОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МОНТЕ-КАРЛО

Предложен новый метод измерения оптических свойств рассеивающих сред, в основе которого лежит измерение рассеяния с использованием подвижных интегрирующих сфер и сопоставление экспериментальных данных с результатами теоретического моделирования распространения излучения в образце методом Монте-Карло.

N.V. KOVALENKO[1], G.A. ALOIAN[1], D.M. MUKHANKOV[2],
T.K. KARPOVA[1], A.V. SMIRNOV[1], O.A. RYABUSHKIN[1,2]
[1]*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),*
Dolgoprudny
[2]*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

MEASUREMENT OF THE OPTICAL PROPERTIES OF SCATTERING MEDIA BASED ON THE GONIOMETRIC METHOD USING INTEGRATING SPHERES AND MONTE CARLO MATHEMATICAL MODELING

A new method for measuring the optical properties of scattering media, which is based on the goniometric measurement of scattered radiation using variable integrating spheres geometry and theoretical modeling by the Monte Carlo method is proposed.

Рассеяние оптического излучения играет существенную роль во многих областях оптики. В частности, к сильно рассеивающим средам относятся биологические ткани. Измерение оптических свойств различных тканей является необходимым для выявления особенностей их взаимодействия с излучением [1]. Основными параметрами, характеризующими оптические свойства, являются коэффициенты поглощения (μ_a), рассеяния (μ_s), анизотропии рассеяния (g) и преломления

(n). Как правило, для измерения коэффициентов μ_a, μ_s, g биологических объектов используют оптические интегрирующие сферы, усредняющие всё попадающее внутрь излучение по пространству. Чаще всего измеряются мощности излучения, рассеянного вперед и назад, в тонком плоском образце. Однако ввиду малого количества измеряемых величин такие методы оказываются чрезвычайно чувствительными к ошибкам измерений [2].

В данной работе мы представляем новый метод измерения оптических свойств материалов, основанный на применение интегрирующих сфер.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Образец располагался между двумя интегрирующими сферами S_T и S_R. Расстояния L_T и L_R от образца до сфер могут изменяться, что позволяет измерять зависимость мощности рассеянного образцом излучения в различные телесные углы. Оптические свойства образцов восстанавливались на основе подбора параметров математической модели, описанной в работе [3]. Данный метод был успешно применен для определения оптических свойств молока и яичного желтка, широко представленных в работах [4, 5]. Характерные измеряемые и модельные зависимости приведены на рис. 2. По сравнению с традиционными методами измерения рассеяния с использованием интегрирующих сфер большее количество экспериментальных данных, получаемых в предлагаемом методе, делает его более точным и надежным.

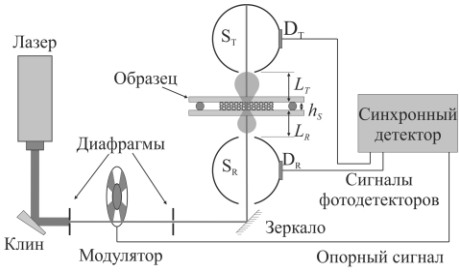


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

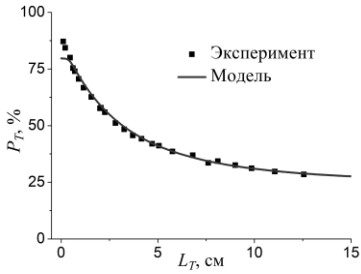


Рис. 2. Доля мощности, попадающая в сферу S_T

Список литературы

1. Niemz M.H. // Berlin: Springer, 2004.
2. Zhang M. // Postharvest Biology and Technology. 2015. P. 14.
3. Jacques S.L. // Dordrecht: Springer, 2011. V. 71. P. 109-144.
4. Aernouts B. et. al. // Journal of Dairy Science. 2015. V. 98. P. 6727-6738.
5. Pickering J.W. // Journal of Photochemistry and Photobiology. 2004. V. 16. P. 101-111.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ЧЕРНОВ[1], А.А. ЛЯПИН, А.М. КУЗЬМИН[1]
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск
[1]ООО «Фотонные Технологические Системы», Саранск

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЭКРАНЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

В настоящей работе представлены результаты разработки люминесцентного экрана на основе полимерного материала полученного методом экструзии. Полимерный материал способен визуализировать лазерное излучение в спектральном диапазоне 0.8-2.13 μм. Обсуждается применение люминесцентных экранов для визуализации инфракрасных лазерных пучков большого диаметра.

M.V. CHERNOV[1], A.A. LYAPIN, A.M. KUZMIN[1]
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk
[1]Photon Technology Systems, Saransk

LUMINESCENT SCREENS FOR OBSERVING LARGE-DIAMETER INFRARED LASER BEAMS

This paper presents the results of the development of a luminescent screen based on a polymer material obtained by extrusion method. Polymer material is able to visualize laser radiation in the spectral range of 0.8-2.13 μm. The application of luminescent screen for visualization of large-diameter infrared laser beams is discussed.

В настоящее время лазеры инфракрасного (ИК) спектрального диапазона нашли широкое применение в различных областях науки и техники: обработка материалов, зондирование атмосферы, специальные применения, медицина [1-4]. Однако основная проблема работы с лазерами данного диапазона состоит в том, что их излучение невидимо для человеческого глаза. Поэтому для юстировки и работы с ИК-лазерами используют визуализаторы лазерного излучения.

В данной работе были получены люминесцентные пленки, легированные люминофорами, способными преобразовывать ИК лазерное излучение в видимое свечение. В качестве основных компонентов для создания пленки применялись порошки различных люминофоров и гранулированный полиэтилен. Методика получения полимерной пленки для визуализации лазерного ИК-излучения основана на процессах

экструзии. Благодаря этому возможно изготовление преобразующего полимерного материала большого размера (площадь более 1 м^2) способного эффективно преобразовывать лазерное излучение ИК диапазона. Примеры полученных люминесцентных экранов и спектральный диапазон их работы представлены на рис. 1 и 2, соответственно. Как можно увидеть из рис. 2, полученный материал способен эффективно преобразовывать лазерное излучение в широком диапазоне 0.8 - 2.13 мкм. Созданный материал может быть использован при проведении испытаний ИК-лазеров на полигонах в различных погодных условиях.

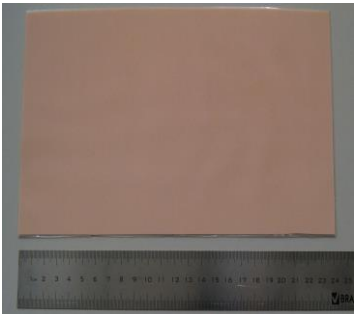


Рис. 1. Пример изготовления люминесцентного экрана для детектирования инфракрасных лазерных пучков

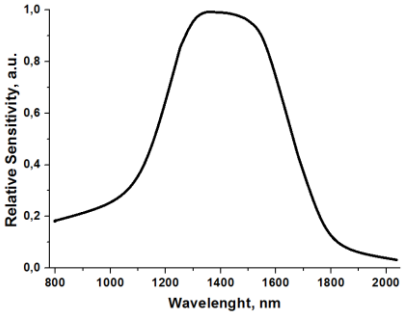


Рис. 2. Спектральный диапазон работы полученного полимерного материала

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-42-130011.

Список литературы

1. Chen M., Rudd W.J. et. al. // Laser Radar Technology and Applications XXIV. 2019. V. 11005.

2. Nabiev S.S., Ivanov S.V., Lagutin A.S. et. al. // Russian Journal of Phys. Chem. 2019. V. 13(5). P. 727

3. Kononenko T.V., Pivovarov P.A., Khomich A.A. et. al. // Optics & Laser Technology. 2019. V. 117. P. 87.

4. Rafailov M.K.// Proc. of SPIE. 2009. V. 7325.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. ШОСТКА, Н.В. ШОСТКА, В.И. ВЕРШИЦКИЙ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАТРАТНЫХ СТРУКТУР В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

В работе приведены результаты экспериментов по формированию и анализу клатратных структур в приповерхностных слоях водных растворов. Применен метод исследования, основанный на интерференции лазерных лучей, прошедших через каплю воды, помещенную в треугольную ячейку. Показано, что водные растворы обладают свойствами, связанными с наличием порядка в клатратных состояниях вследствие кооперативного эффекта структурных изменений в неоднородной сетке водородных связей. Обнаружено, что в диапазоне средних концентраций веществ в водных растворах, несмотря на некоторую стабилизацию структур в сформированных клатратах в зависимости от количества взаимодействующих молекул возможны образования ассоциатов различной формы.

V.I. SHOSTKA, N.V. SHOSTKA, V.I. VERSHITSKY
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

COMPARATIVE ANALYSIS OF CLATRATE STRUCTURES IN NEAR-SURFACE LAYERS OF AQUEOUS SOLUTIONS

The paper presents the results of experiments on the formation and analysis of clathrate structures in the surface layers of aqueous solutions. We applied the research method based on the interference of laser beams that passed through a drop of water placed in a triangular cell. It is shown that aqueous solutions have properties associated with the presence of order in clathrate states due to the cooperative effect of structural changes in an inhomogeneous network of hydrogen bonds. In the range of average concentrations of substances in aqueous solutions, in spite of some stabilization of structures, solutions have significant heterogeneity. In the formed clathrates, depending on the number of interacting molecules, the formation of associates of various shapes is possible.

Процессы получения эллиптических дифракционных омбилик в капле воды достаточно подробно были рассмотрены в работах М.В. Берри с соавторами [1]. Однако, при изучении оптических каустик, не было уделено достаточного внимания тонкой структуре полученных дифракционных картин.

Исследуя образование каустик в капле воды, помещенной в треугольную ячейку, более 15 лет назад, мы уже тогда обратили внимание на то, что по мере высыхания капли существенно изменяется структура ее приповерхностного слоя [2]. Взаимодействие воды с различными гидрофильными и гидрофобными веществами с точки зрения изменения структуры их водных растворов практически не изучено. В связи с чем данное исследование является актуальным как с чисто научной точки зрения, так и с точки зрения практического применения данных растворов в фармакологии, медицине и пищевой промышленности. В отличие от воды смешанные ассоциаты в водных растворах могут формироваться, распадаться и вновь образовываться в различных комбинациях. Как было показано в работах [3-5], более устойчивыми являются сдвоенные молекулы воды, имеющие по две водородные связи. Стабилизация кластеров, образующих клатраты в приповерхностном слое воды, может быть связана с высокой структурной упорядоченностью слоя. По мере удаления от поверхности раздела вглубь жидкости степень упорядоченности понижается и, наоборот, на некотором расстоянии от поверхности упорядоченность соответствует состоянию жидкости в объемной фазе [6, 7].

Поскольку в воде существуют две разновидности молекул, одна из которых образует тетраэдрический каркас, а другая заполняет его полости, то в результате проведенных исследований и идентификации зафиксированных структур клатратов (ассоциатов) в водных растворах можно предположить, что молекулы растворенных в воде гидрофильных веществ образуют либо кластеры различного типа, либо цепочки, связанные друг с другом посредством водородных связей.

Список литературы

1. Berry M.V., Nye J.F. et. al. // Phil. R. Soc. - Lond. 1979. V. 291. P. 451-543.

2. Shostka V.I., Lapaeva S.N. et. al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5582(26). P. 187-195.

3. Шостка В.И., Шостка Н.В., Доненко И.Л. // Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. 2017. Т. 1.(3). С. 44-52.

4. Шостка В.И., Шостка Н.В. // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 665-666.

5. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И. // Сборник трудов второй всероссийской конференции «Физика водных растворов». Москва, 2019. С. 94-96.

6. Шостка В.И., Шостка Н.В. // Сборник тезисов докладов международной конференции «Физика. СПб». СПб, 2019. С. 338-339.

7. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И. // Сборник трудов конференции ИТНТ-2019. Самара, 2019. С. 128-132.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. ИСМАГИЛОВ, А.А. ГЕНДРИНА, Е.А. ПОНОМАРЕВА,
С.Э. ПУТИЛИН, А.Н. ЦЫПКИН, С.А. КОЗЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ СТРУИ ЭТАНОЛА

Показано, что энергия терагерцовых волн при лазерной филаментации в условиях двухимпульсного одноцветного возбуждения увеличивается на порядок по сравнению с одноимпульсной накачкой. Приведены зависимости усиления энергии терагерцового поля от временной задержки между двумя коллинеарными субпикосекундными импульсами.

A.O. ISMAGILOV, A.A. GENDRINA, E.A. PONOMAREVA,
S.E. PUTILIN, A.N. TSYPKIN, S.A. KOZLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

TERAHERTZ WAVES GENERATION DURING DOUBLE-PULSE SINGLE COLOR LASER EXCITATION OF ETHANOL JET

The 10-fold terahertz energy enhancement during double-pulse single-color laser excitation of an ethanol jet in case of filamentation is demonstrated compared to single-pulse case. The dependences of the terahertz field energy enhancement on the temporal delay between two collinear subpicosecond pulses are presented.

Разработка высокоэффективного и доступного источника излучения терагерцового (ТГц) диапазона является значимой проблемой последние десятки лет [1]. Эффективным является метод, основанный на взаимодействии мощных лазерных импульсов с веществом и последующем плазмообразовании. Учитывая, что динамика электронов в плазме является одним из основным механизмом формирования ТГц волн, использование жидких сред в качестве активной среды является многообещающим. Нелинейные эффекты в жидкостях проявляются сильнее чем в газах при тех же значениях мощностей накачки, а процесс ионизации проходит эффективнее за счет в три раза большей молекулярной плотности. Высокий потенциал жидких сред продемонстрирован в ряде работ [2-5], в последней из которых [6] изменение конфигурации струи воды позволило получить значения по

оптико-терагерцовому преобразованию, превышающему таковое в двухцветном филаменте в воздухе. Тем не менее, они все еще недостаточны для практического применения и открывают широкое поле для новых идей об эффективных методах его увеличения. Идея о усилении энергии ТГц излучения при падении сигнала на предварительно ионизованную среду привела к использовании метода двойной накачки для поставленной задачи.

Целью работы является экспериментальное исследование усиления энергии ТГц волн, генерируемых при двухимпульсуной одноцветной накачке струи этанола. В исследованиях используется фемтосекундный лазер с излучением на длине волны 800 нм, горизонтальной поляризацией, энергией до 2 мДж и варьируемой длительностью импульса от 30 до 700 фс. Лазерный пучок разделяется на пучок зондирования и накачки, последний из которых делится далее на опорную и сигнальную части в интерферометре Майкельсона. Накачка фокусируется параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 5 см на плоскую струю воды (рис. 1), которая в свою очередь установлена на угловой подвижке, что позволяет изменять угол падения излучения на вещество. Оптимальные углы падения излучения на струю выбирались исходя из результатов прошлой работы, где $\varphi = 65\,°$ для воды [3]. Регистрация ТГц волн происходит с помощью стандартной электрооптической схемы, позволяющей детектировать спектр в диапазоне до 3 ТГц.

Продемонстрированы зависимости усиления энергии терагерцового поля от временной задержки между сигнальным и опорным импульсами.

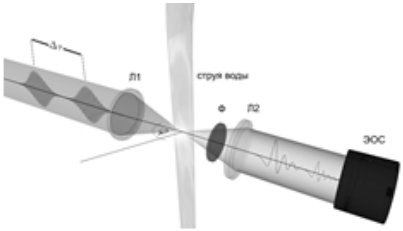


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Hafez H., Chai X. et. al. // Journal of Optics. 2016. V. 18 (9). P. 093004.
2. Jin Q., Yiwen E. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111 (7). P. 071103.
3. Yiwen E., Jin Q. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113(18). P. 181103.
4. Tcypkin A.N., Ponomareva E.A. et. al. // Optics Express. 2019. V. 27(11). P. 15485-15494.
5. Balakin A.V., Coutaz J.-V. et. al. // Photon. Res. 2019. V. 7. P. 678-686.
6. Zhang L., Wang W.-M. et. al. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 12(1). P. 014005.

УДК 535(06)+004(06)

П.П. МИРОНОВ, В.А. ЛАПИН, И.А. ЩУКАРЕВ
Ульяновский государственный университет

ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Исследуется возможность генерации субпикосекундных импульсов в результате развития модуляционной неустойчивости квазинепрерывных волновых пакетов в световодах с бегущей волной показателя преломления. Показано, что пиковая мощность соответствующих импульсов может на порядки превосходить мощность исходного фонового излучения.

P.P. MIRONOV, V.A. LAPIN, I.A. SHCHUKAREV
Ulyanovsk State University

GENERATION OF ULTRASHORT LASER PULSES THROUGH A RESONANT INTERACTION OF QUASI-CONTINUOUS WAVE PACKET WITH RUNNING REFRACTIVE INDEX WAVE

Modulation instability followed by generation of subpicosecond pulses could be obtained with quasicontinuous wave packets propagating in optical fibers with running refractive index wave. We report on comprehensive studies of this process demonstrating that the peak power of the pulses exceeds the power of the pumping radiation by orders of magnitude. Practically, the effect could be implemented through interaction of the surface optical wave with an acoustic wave in 2-cm cylindrical waveguide in a robust all-fiber format.

Известно, что при распространении светового импульса по световоду, в котором создана бегущая волна показателя преломления (БВПП), могут наблюдаться эффекты, не имеющие места как в световодах однородных, так и в световодах со статической неоднородностью или периодичностью [1, 2]. В работах [3, 4] исследовались эффекты, связанные с изменением поляризации и смещением несущей частоты квазимонохроматических волновых пакетов под влиянием БВПП.

Модуляционная неустойчивость – неустойчивость стационарного состояния, вызванная совместным действием нелинейных и

дисперсионных эффектов, наблюдается во многих нелинейных средах, поддерживающих распространение локализованных волн.

Для волнового пакета, который в световоде распространяется с групповой скоростью, равной скорости БВПП, уравнение для огибающей можно записать в виде:

$$\frac{\partial A}{\partial z}+v_g^{-1}\frac{\partial A}{\partial t}-i\frac{d_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}+\frac{d_3}{6}\frac{\partial^3 A}{\partial t^3}+iR|A|^2 A=i\Delta\beta A, \qquad (1)$$

где $v_g=(\partial\omega/\partial\beta)_{\omega_0}$ – групповая скорость волнового пакета, $d_n=(\partial^n\beta/\partial\omega^n)_{\omega_0}$ – дисперсионные параметры второго и третьего порядка при $n=2,3$, R – параметр кубической (керровской) нелинейности.

На рис. 1*a* и 1*b* представлена форма сверхимпульса в области $z\approx z_m$, демонстрирующая общую структуру импульса в области его максимального сжатия.

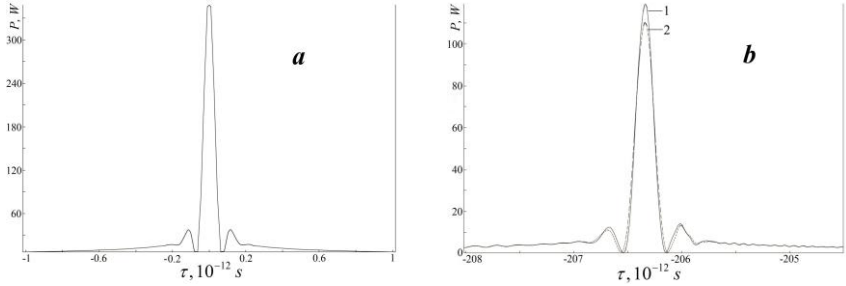


Рис. 1. Зависимость мощности формируемого СИ от времени на длине $z\approx z_s=497\,m$; $d_2=-10^{-26}\,c^2/м$, $P_0=0.1W$, $\Omega=10^9\,s^{-1}$, $\beta=10^7\,m^{-1}$, $\Delta n=10^{-4}$, $d_3=0$ (*a*); $d_3=10^{-40}\,s^3/m$, $R=10^{-2},10^{-3}\left(W\cdot m\right)^{-1}$ (1) и $R=10^{-3}\left(W\cdot m\right)^{-1}$ (2) (*b*)

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проектов № 18-32-00957 и 19-42-730013.

Список литературы

1. Torchigin V.P. // Quantum Electron. 1993. V. 23 (3). P. 235-240,
2. Torchigin V.P. // Quantum Electron. 1995. V. 25 (5). P. 484-485, 1995.
3. Torchigin V.P. // Quantum Electron. 1993. V. 23 (3). P. 241-246.
4. Zolotovskii I. O., Lapin V.A., Sementsov D.I. // Quantum Electron. 2016. V 46 (1). P. 39-44.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. ИСМАГИЛОВ, Е.А. ПОНОМАРЕВА, С.Э. ПУТИЛИН, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ В ПЛОСКОЙ СТРУЕ ВОДЫ

Представлены экспериментальные зависимости амплитуды терагерцового излучения формируемого при филаментации в плоских струях воды от температуры используемой жидкости. Продемонстрировано уменьшение амплитуды терагерцового излучения с увеличением температуры жидкости. Понижение температуры ниже комнатной ($t < 21$ ˚C) позволило увеличить эффективность генерации терагерцового излучения.

A.O. ISMAGILOV, E.A. PONOMAREVA, S.E. PUTILIN, A.N. TSYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

IMPACT OF TEMPERATURE OF LIQUID ON THE EFFICIENCY OF TERAHERTZ WAVE GENERATION BY LASER FILAMENTATION IN FLAT WATER JET

Results of experimental measurements of dependence of terahertz generation in jets of water on temperature of liquids are shown. A decrease in amplitude with increasing temperature are is demonstrated. Decreasing the temperature below room temperature ($t < 21$ ˚C) allowed to increase the efficiency of generation of terahertz radiation.

Терагерцовое излучение используется в различных областях: от систем безопасности до различных биомедицинских исследований. Однако, исследование жидкостей данным типом излучения считалось невозможным из-за высокого коэффициента поглощения. С другой стороны, как продемонстрировано в работах [1, 2], методом одноцветной филаментации фемтосекундного излучения в плёнках жидкостей возможна высокая эффективность генерации терагерцового излучения. В продолжение данной тематики появились исследования генерации терагерцового излучения в струях жидкостей. В работах [3-5] продемонстрированы результаты оценки эффективности генерации терагерцового излучения данным методом в зависимости от различных

параметров: характеристик излучения накачки, свойств различных жидкостей и растворов. Данная работа посвящена оценке эффективности генерации терагерцового излучения в зависимости от температуры используемой жидкости.

Для проведения эксперимента использовалась схема, аналогичная представленным в статье [3]. Центральная длина волны возбуждающего излучения 800 нм, энергия импульса 0.3 мДж, длительность импульса 250 фс, частота повторения 1 кГц, угол падения излучения накачки 60 °. Излучение накачки параболическим зеркалом фокусировалось на струе воды (толщина струи 100 мкм), где в процессе филаментации генерировалось ТГц излучение. Для регистрации терагерцового излучения использовалась стандартная схема электрооптического детектирования. Температура жидкости регулировалась путём нагрева и охлаждения контура подачи жидкости.

Для получения данных на каждой из выбранных значений температуры произведена оценка энергии усредненного сигнала терагерцового излучения. Рассчитаны отношения значений энергии терагерцового излучения при различных температурах к энергии терагерцового излучения при комнатной температуре ($t \approx 21$ °C). Полученные данные демонстрируют уменьшение эффективности генерации терагерцового излучения при увеличении температуры и увеличение эффективности генерации терагерцового излучения при уменьшении температуры.

Список литературы

1. Jin Q., Yiwen E., Williams K., Dai J., Zhang X.-C. Observation of broadband terahertz wave generation from liquid water // Appl. Phys. Lett. Phys. Rev. Lett. 2017. V. 111. P. 071103.

2. Dey I. et. al. Highly efficient broadband terahertz generation from ultrashort laser filamentation in liquids // Nature communications. 2017. V. 8. № 1. P. 1184.

3. Tcypkin A.N., Ponomareva E.A, Putilin S.E., Smirnov S.V., Shtumpf S.A. et. al. Concentration dependence of terahertz generation in jets of water and ethanol mixtures // Proc. SPIE. 2018. V. 10826. P. 1082603.

4. Tcypkin A.N., Putilin S.E., Shtumpf S.A., Smirnov S.V., Yiwen E., Melnik M.V., Ponomareva E.A., Bespalov V.G., Kozlov S.A., Zhang X.-C. Investigation of terahertz generation in water jet in dependence on parameters of excitation pulse // Proceedings - International Conference Laser Optics (ICLO 2018). 2018. P. 364.

5. Ponomareva E.A., Stumpf S.A., Tcypkin A.N., Kozlov S.A. Impact of laser-ionized liquid nonlinear characteristics on the efficiency of terahertz wave generation // Optics Letters. 2019. V. 44. No. 22. P. 5485-5488.

УДК 535(06)+004(06)

С.С. АЛИЕВА, К.Н. АЛЕКСЕЕВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ МОД В ПЕТЛЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ ВВОДА-ВЫВОДА

В работе рассмотрено распространение электромагнитного поля в волоконном петлевом резонаторе ввода-вывода на базе одномодовых волокон на основании теории связанных мод. Получено аналитическое выражение, позволяющее установить эволюцию произвольного поля, поданного на вход резонатора.

S.S. ALIEVA, C.N. ALEXEYEV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

PROPAGATION OF FUNDAMENTAL MODES IN THE INPUT-OUTPUT LOOP RESONATOR

The paper considers the propagation of the electromagnetic field in a fiber ring input-output resonator based on single-mode fibers on the basis of the theory of coupled modes. An analytical expression is obtained that allows us to determine the evolution of an arbitrary field fed to the input of the resonator.

Петлевые резонаторы используют в датчиках температуры, давления, механических перемещений, вибраций и показателя преломления среды [1, 2]. А также такие резонаторы находят применение в нелинейной оптике для получения оптических сигналов высокой мощности [3].

Целью работы является изучение распространения фундаментальных мод в петлевом оптическом резонаторе, сформированном на одномодовых оптических волокнах.

Петлевой резонатор ввода-вывода представляет собой петлю оптического волокна без оболочки, эванесцентно связанную с идеальным оптическим волокном (рис. 1).

Сигнал подается на вход нижнего волокна, проходит петлевой участок, затем в выделенном участке он посредством эванесцентного спаривания возбуждает линейный участок. Выходом резонатора является выход нижнего и верхнего волокна. Длина участка взаимодействия волокон s_0.

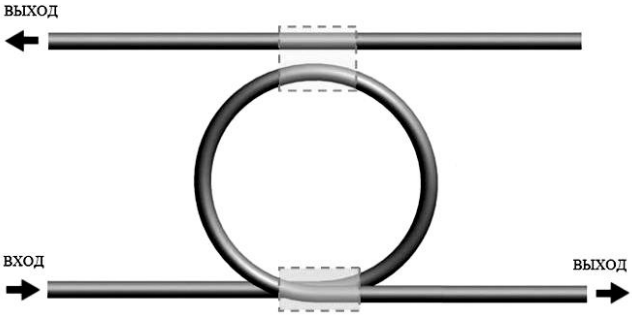


Рис. 1. Петлевой резонатор ввода-вывода с перехлестом волокон

На основании численного моделирования была решена система уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{C}_1 e^{i(\tilde{\beta}+\Delta\beta)s_0} + \tilde{C}_2 e^{i(\tilde{\beta}-\Delta\beta)s_0} = E \\ \tilde{C}_1 e^{i(\tilde{\beta}+\Delta\beta)s_0} - \tilde{C}_2 e^{i(\tilde{\beta}-\Delta\beta)s_0} = F \\ C_1 e^{i(\tilde{\beta}+\Delta\beta)s_0} + C_2 e^{i(\tilde{\beta}-\Delta\beta)s_0} = B \\ C_1 e^{i(\tilde{\beta}+\Delta\beta)s_0} - C_2 e^{i(\tilde{\beta}-\Delta\beta)s_0} = D \end{cases}$$

и получены зависимости амплитуд входного и выходного полей (рис. 2).

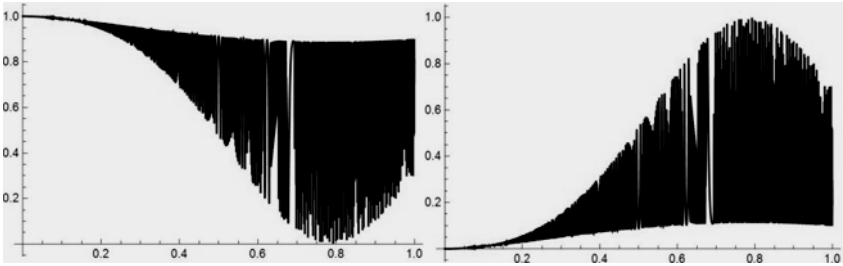


Рис. 2. Зависимость амплитуд выходящих полей D и F (в единицах мощности падающего пучка) от длины s_0 (в м) участка взаимодействия

Список литературы

1. Sumetsky M. Optical microfiber coil delay line // Opt. Express. 2009. V. 17. P. 7196-7205.

2. Alexeyev C.N., Pogrebnaya A.O., Milione G., Yavorsky M.A. Propagation of light in a circular array of elliptical fibres // J. Opt. 2016. V. 18. P. 025602.

3. Alexeyev C.N., Milodan A.V., Alexeyeva M.C., Yavorsky M.A. Inversion of the topological charge of optical vortices in a coil fiber resonator // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 1526-1529.

УДК 535(06)+004(06)

К.В. ПАРПУЛОВА, М.В. МЕЛЬНИК, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ФЕМТОСЕКУДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ГРЕБЕНОК В СРЕДЕ С НОРМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Приведены результаты численного моделирования распространения временных последовательностей, образованных с помощью интерференции двух фемтосекундных лазерных импульсов с линейным чирпом и супергаусовым профилем, в среде с нормальной дисперсией. Показано, что в процессе распространения спектральный состав такого сигнала не изменяется, а уширение во временной области не приводит к потере передаваемой информации.

K.V. PARPULOVA, M.V. MELNIK, A.N. TCYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

NUMERICAL SIMULATION OF FEMTOSECOND OPTICAL COMBES TRANSMISSION IN A MEDIUM WITH NORMAL DISPERSION

The results of numerical simulation of the frequency combs generated by the interference of two femtosecond laser pulses with a linear chirp and Superhaus profile propagation in a medium with normal dispersion are presented. It is shown that in the process of propagation the spectral composition of such a signal does not change and broadening in the time domain does not lead to loss of transmitted information.

Последние 40 лет объем информации, передаваемой по всему миру, растет в геометрической прогрессии. Такие высокие темпы развития диктуют весьма жесткие требования, предъявляемые к современным и технологиям передачи информации. Так, например, предполагается, что используемый в настоящее время диапазон частот не сможет удовлетворять все более растущим требованиям, и терагерцовый диапазон частот рассматривается как наиболее перспективный для следующих поколений связи [1]. Одной из важных проблем совершенствования систем передачи информации является разработка новых методов кодирования и декодирования сигнала, позволяющих повысить быстродействие и скорость передачи.

Известно, что при интерференции двух чирпированных импульсов с малой временной задержкой происходит формирование квазидискретного

спектра в частотной области и последовательности субимпульсов во временной области, между которыми есть четкое соответствие [2, 3]. Эта особенность позволяет кодировать информацию в одном диапазоне, получая характерную модуляцию в другом. В данной работе исследуются особенности распространения кодированного сигнала, полученного данным методом для анализа его применимости в существующих системах передачи информации.

В качестве среды был выбран плавленый кварц со следующими параметрами: $N_0 = 1{,}45$, $a = 2{,}74\times10^{-44}$ с^3/см, $b = 3{,}94\times10^{17}$ (с×см)$^{-1}$. Распространение проводилось на дистанцию 50 мм. На рис. 1 представлены результаты проведенного численного моделирования. Видно, что сигнал при распространении расплывается и уменьшается по амплитуде, но не искажает свою форму. Стоит также отметить, что спектр импульса не изменился, что позволяет декодировать информацию после распространения без ошибок.

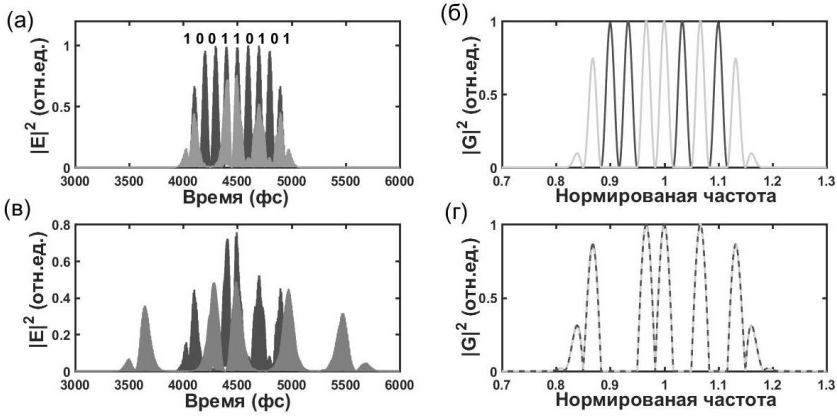


Рис. 1. Результат кодирования сигнала (а) и спектр исходного (темная линия) и модулированного сигнала (светлая линия) (б); модулированный сигнал до (темная линия) и после (светлая линия) распространения на 50 мм (в); соответствующие им спектры (г)

Список литературы

1. O'Hara J.F. et. al. // Technologies. 2019. V. 7(2). P. 43.
2. Melnik M. et. al. // Applied Physics B. 2019. V. 125(6). P. 98.
3. Tcypkin A.N., Putilin S.E. //Applied Physics B. 2017. V. 123(1). P. 44.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. БАРШАК, К.Н. АЛЕКСЕЕВ, Д.В. ВИКУЛИН,
Б.П. ЛАПИН, М.А. ЯВОРСКИЙ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

CNOT-ГЕЙТ В МУЛЬТИГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

В работе продемонстрирована возможность управления топологическим зарядом выходного оптического вихря путем управления знаком циркулярной поляризации входного вихря в мульти-геликоидальных оптических волокнах. На основании этого эффекта предложен волоконный эффективный метод реализации базового логического вентиля – CNOT.

E.V. BARSHAK, C.N. ALEXEYEV, D.V. VIKULIN,
B.P. LAPIN, M.A. YAVORSKY
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

CNOT-GATE IN MULTIHELICAL OPTICAL FIBRES

We demonstrated the possibility to control topological charge of the output optical vortex by controlling the sign of circular polarization of the input vortex beam in multi-helicoidal optical fibers. Based on this effect, we proposed the all-fiber effective method for implementing a basic logic gate CNOT.

ОУМ-технологии [1] являются крайне актуальным направлением в современном научном мире благодаря широким возможностям их практического применения. В частности, классические состояния фотонов с ОУМ используются в области моделирования квантовых алгоритмов [2, 3], являющихся основой прогнозируемой вычислительной мощности квантовых компьютеров. Одной из основных задач данной сферы исследований является проблема реализации базовых логических операций (гейтов) над состояниями с разными значениями ОУМ. Целью данной работы является демонстрация способности мульти-геликоидальных оптических волокон (МГВ) (рис. 1) с крутильными механическими напряжениями осуществлять управляемую поляризацией инверсию топологического заряда оптического вихря (ОВ), что позволяет реализовать один из ключевых логических гейтов CNOT.

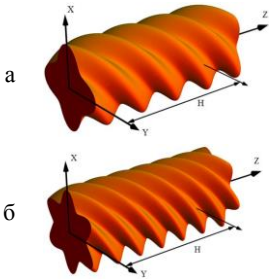


Рис. 1. Модели МГВ, H – шаг скрутки, порядок симметрии: $\tau = 4$ (а), $\tau = 6$ (б)

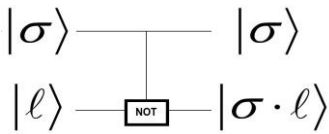


Рис. 2. Схема гейта CNOT: роль управляющего кубита играет состояние циркулярной поляризации ОВ, σ=±1; управляемого – топологический заряд ОВ, ℓ=±| ℓ|

Моды МГВ вблизи особых резонансных значений шага скрутки представлены суммой парциальных ОВ с собственными фазовыми множителями (имеют блоховскую структуру). Анализ показывает, что в такой резонансной точке на оптимальной длине волокна имеет место следующее преобразование входного ОВ: $|1,1\rangle \to |1,-1\rangle$ (*), где $\ell = \pm|\ell|$ – топологический заряд ОВ, тогда как $|-1,|1|\rangle$ и $|-1,-|1|\rangle$ с высокой степенью точности являются модами и поэтому не меняют своей структуры при распространении: $|-1,1\rangle \to |-1,1\rangle$ (**).

Из выражений (*) и (**) следует вывод о возможности управления знаком топологического заряда выходного ОВ с помощью МГВ с КМН путем управления знаком циркулярной поляризации входного ОВ (рис. 2). Демонстрируемый эффект указывает на теоретическую возможность создания фундаментального логического двухкубитного вентиля – CNOT, где управляющим кубитом служит состояние циркулярной поляризации σ = ±1, а управляемым – топологический заряд ОВ ℓ = ±| ℓ| (рис. 2).

Заключение: предложен эффективный волоконный метод реализации требуемого для моделирования квантовых алгоритмов гейта CNOT над состояниями ОВ с целым на фотон ОУМ в МГВ.

Работа выполнена при поддержке КФУ имени В.И. Вернадского, Программа развития 2015 − 2024, проект ВГ10/2018.

Список литературы

1. Padgett M.J. // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 11265-11274.
2. Spreeuw R.J.C. // Phys. Rev. A. 2001. V. 63, P. 062302.
3. Ma S., Chen Z., Sun H., Dutta N.K. // Opt. Express. 2010. V. 18, P. 6417-6422.

УДК 535(06)+004(06)

И.А. ЩУКАРЕВ, Д.А. КОРОБКО, М.Ю. САЛГАНСКИЙ[1],
И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, П.П. МИРОНОВ
Ульяновский государственный университет
[1]Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН,
Нижний Новгород

ГЕНЕРАЦИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КОРОТКИХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Исследована эволюция лазерного импульса в волоконном усилителе с нормальной дисперсией. Рассмотрены случаи идеального, однородного по спектру усиления, и усиления с ограничением по спектру. Показано, что трансформация огибающей входного импульса к параболическому виду возможна не только для спектрально-плоского, но и для спектрально-ограниченного усиления.

I.A. SHCHUKAREV, D.A. KOROBKO, M.Yu. SALGANSKII[1],
I.O. ZOLOTOVSKII, P.P. MIRONOV
Ulyanovsk State University
[2]G.G. Deviatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod

GENERATION OF PARABOLIC LASER PULSES IN SHORT FIBER AMPLIFIERS

The laser pulse evolution in a normal-dispersion fiber amplifier is studied. The cases of ideal spectrum-homogeneous and transform-limited amplification are considered. It is shown that the envelope transformation of the input pulse to a parabolic form is possible not only for spectrally-flat amplification, but also for transform-limited one.

Технологии импульсных волоконных лазеров и усилителей в настоящее время востребованы в широким круге приложений – в оптической связи, обработке материалов, медицине и т.д. [1, 2]. Распространение сигнала в усилителе описывается уравнением Гинзбурга-Ландау для комплексной амплитуды поля $A(z,t)$ [3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i\frac{\beta_2 - ig/\Omega_g^2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2 A = gA \qquad (1)$$

где z – продольная координата, t – время в бегущей системе координат, $\beta_2 > 0$ – коэффициент нормальной ДГС, γ – параметр керровской нелинейности волокна, g – инкремент усиления, Ω_g определяет ширину

линии усиления (в c^{-1}). В качестве начального импульса используется спектрально-ограниченный гауссов импульс длительностью $\tau = 0.3$ пс, пиковая мощность $P = 100$ Вт, $\gamma = 6\ \text{Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, $\beta_2 = 50\ \text{пс}^2/\text{км}$, $g_0 = 0.88\ \text{м}^{-1}$

Уравнение (1) с указанными параметрами было промоделировано стандартным SSF (split step Fourier) методом [3]. Как можно видеть, импульс в начальной фазе усиления далек от асимптотики (рис. 1a). Фактическое совпадение результатов моделирования с асимптотикой наступает после прохождения нескольких метров в усиливающем волокне (рис. 1b).

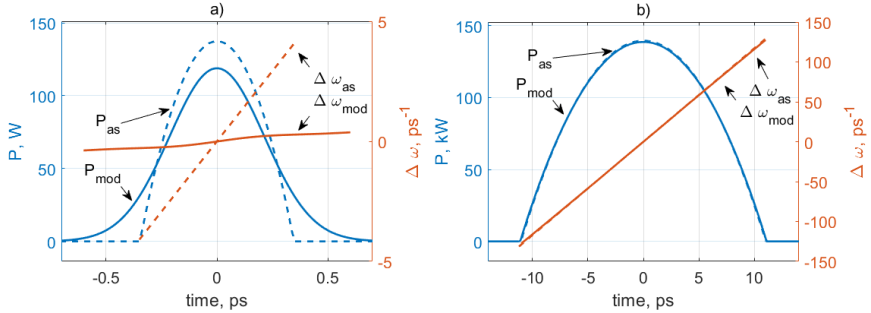


Рис. 1. Плоское по спектру усиление без насыщения, импульс и изменение его мгновенной частоты на длине усилителя $L = 0.1$ м (a) и 6 м (b), результаты моделирования – сплошные, расчет по асимптотическим выражениям – штриховые линии

Работа выполнена при поддержки РФФИ (проект № 19-42-730013).

Список литературы

1. Fermann M.E., Hartl I. // Nature photonics. 2013. № 7. P. 868.
2. Gumenyuk R, Okhotnikova E.O., Filippov V., Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Guina M. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. № 24. P. 0901914.
3. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Springer, fourth edition, 2007.
4. Dudley J.M., Finot C., Richardson D.J., Millot G. // Nat. Phys. 2007. № 3. P. 597.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. БОГДАНОВА[1], Н.А. ГРАЧЁВ[1], В.А. ЩЕРБАКОВА[1,2], Д.Н. СУШКО[1], А.Ю. ПЕТУХОВА[1,3]

[1]Пермская научно-производственная приборостроительная компания
[2]Пермский государственный научно-исследовательский университет
[3]Пермский научно-исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

В работе рассматривается чувствительность цельноволоконного датчика температуры. Для изучения зависимости было разработано и собрано специальное устройство для проверки чувствительности датчика к изменениям температуры в диапазоне от 20 до 320 °С. В ходе исследования был получен график зависимости спектра от температуры. Таким образом, температурная чувствительность датчика составила 2,5 °С.

E.V. BOGDANOVA[1], N.A. GRACHEV[1], V.A. SHCHERBAKOVA[1,2], D.N. SUSHKO[1], A.Yu. PETUKHOVA[1,3]

[1]Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company
[2] Perm National Research Polytechnic University
[3] Perm State University

RESEARCH THE ALL-FIBER SENSOR SENSITIVITY IN WIDE TEMPERATURE RANGE

This article examines the sensitivity of the all-fiber temperature sensor. To study the dependence, a special device was developed and assembled to check the sensitivity of the sensor to temperature changes in the range from 20 to 320 °C. During the study, a graph of the spectrum dependence on temperature was obtained. Thus, the temperature sensitivity of sensor was 2.5 °C.

На сегодняшний день стало актуальным применение волоконно-оптических датчиков, сформированных внутри одномодовом радиационно-стойком световоде. Такие датчики состоят из микрополостей и представляют собой термочувствительный интерферометр Фабри-Перо.

Целью данной работы является исследование чувствительности датчика к широкому диапазону температур.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. В ходе эксперимента волокно помещалось в термокамеру 1, в которой температура повышалась от 20 до 320 °С с шагом 30 °С. Опрос отраженного спектра проводился интеррогатором. Он состоял из волоконного объединителя 2, широкополосного источника излучения 3, спектроанализатора 4. На рис. 2 представлен график отражения интерферометра Фабри-Перо.

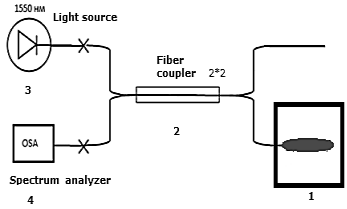


Рис. 1. Схема установки по измерению термочувствительности

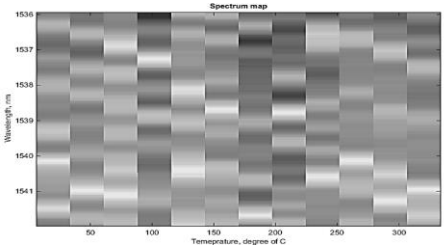


Рис. 2. График отражения интерферометра Фабри-Перо при нагреве от 20 до 320 °С.

Из графика видно, что с увеличением температуры, происходит смещение спектра в длинноволновую область. Это обусловлено тем, что под воздействием температуры, волокно претерпевает изменение физической длины. Следовательно, нагрев вызывает сдвиг длины волны. Зависимость сдвига спектра носит характер близкий к линейному.

В результате исследования характеристик одномодового радиационно стойкого световода получены калибровочные графики зависимости спектра от температуры, и определена температурная чувствительность, которая составила 15,7±0,7 пм/°С.

Список литературы

1. Antunes P., Domingues M., Alberto N., André P. Optical fiber microcavity strain sensors produced by the catastrophic fuse effect // IEEE Photon. Technol. Lett. 2014. V. 26(1). P. 78-81.

2. Pinet É. Fabry-Pérot fiber-optic sensors for physical parameters measurement in challenging conditions // J. Sensors. 2009. 720980-1-9.

3. Буфетов И.А., Дианов Е.М. Оптический разряд в волоконных световодах // УФН. 2005. Т. 175. № 1. С. 100–103.

4. Liao C.R., Hu T.Y., Wang D.N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing // The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China. 2012.

УДК 535(06)+004(06)

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ
Ульяновский государственный университет

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С ДИСПЕРСИЕЙ КАСКАДНО ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ДЛИНЫ

Исследовалась генерация последовательностей ультракоротких импульсов из квазинепрерывной модулированной волны, распространяющейся в световодах, обладающих различными профилями зависимости дисперсии от длины, вследствие индуцированной модуляционной неустойчивости волны.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV
Ulyanovsk State University

MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS PROPAGATING IN A FIBER WITH A DISPERSION CASCADE DEPENDING ON THE LENGTH

We investigated the generation of sequences of ultrashort pulses from a quasicontinuous modulated wave propagating in fibers with different profiles of the dependence of dispersion on length, due to the induced modulation instability of the wave.

Модуляционная неустойчивость (МН) – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 3]:

$$i\frac{\partial A}{\partial z}-\frac{d_2(z)}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2}+i\gamma|A|^2 A=0\,, \qquad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2=\left(d^2\beta/d\omega^2\right)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, γ – параметр нелинейности. В работе рассматривалась ДГС вида:

$$d_2 = d_{20}\cdot\begin{cases}1, & z<z_0\\ f(z), & z\ge z_0\end{cases} \qquad (2)$$

На рис. 1 приводятся зависимости максимума слабомодулированной волны вида:

$$A(0,\tau)=\sqrt{P_0}\left[1+0.01\cos(\Omega_{\text{mod}}\tau)\right], \qquad (3)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров: начальной мощности $P_0=1$ Вт, длине световода $L=1000$ м, начальной ДГС $d_{20}=-10^{-26}$ с^2/м, дисперсии на выходе из световода $d_2(L)/d_{20}=0.1$, параметре нелинейности $\gamma=10^{-2}$ (Вт·м)$^{-1}$, частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}}=\sqrt{2\gamma P_0/|d_{20}|}$ и при $f(z)=\exp(-b_e z);(1-b_l z);(1+b_h z)^{-1};\exp(-b_g z^2)$ – кривые (1;2;3;4).

Из рис. 1 видно, что наибольшие пиковые мощности генерируемых импульсов в случае каскадной зависимости ДГС достигаются при экспоненциальной и гиперболической профилях дисперсии.

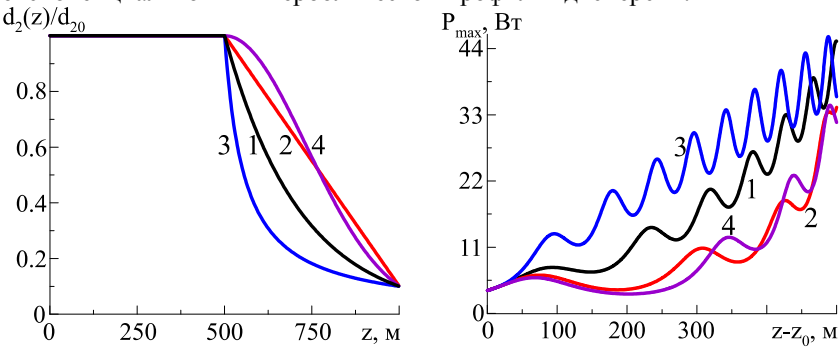


Рис. 1. Нормированные продольные зависимости дисперсии (слева) и максимума модулированной волны (справа)

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проектов № 18-32-00957 и 19-42-730013.

Список литературы

1. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Springer, 2007.

2. Ахметшин У. Г., Богатырев В.А., Сенаторов А.К., Сысолятин А.А., Шалыгин М. Г. // Квантовая электроника. 2003.Т. 33. № 3. С. 265-267.

3. Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S.V. // Opt. Commun. 2018. V. 426. P. 333-340.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. ОПАРИН, М.О. ЖУКОВА, А.Н. ЦЫПКИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЧИРПИРОВАННЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Приведены экспериментальные результаты исследования зависимости длительностей чирпированных терагерцовых импульсов, прошедших через полые металлические круглые волноводы разных диаметров и длин. Показано, что изменение внутреннего диаметра волновода приводит к растяжению импульса не более чем на 50 %. В то же время продемонстрировано увеличение длительности ТГц импульса в 3,7 раза при увеличении длины волновода в 2,5 раза.

E.N. OPARIN, M.O. ZHUKOVA, A.N. TCYPKIN
ITMO University, Saint-Petersburg

EXPERIMENTAL STUDY OF CHIRPED THERAHZ PULSES DURATION DEPENDENCES ON THE PARAMETERS OF A METAL WAVEGUIDE

The results of experimental studies of the dependence of the durations of chirped terahertz pulses passing through hollow metal circular waveguides of different diameters and lengths are presented. It is shown that a change in the inner diameter of the waveguide leads to a stretching of the signal by no more than 50 %. At the same time, a 3.7-fold increase in the duration of the THz pulse was demonstrated with a 2.5-fold increase in the waveguide length.

На данный момент терагерцовые (ТГц) технологии рассматриваются как значимый инструмент для создания физической основы сетей 6G [1]. Уже продемонстрирована возможность передачи информации в квазидискретном спектре, возникающем в результате интерференции двух широкополосных ТГц импульсов [2]. Кодирование же информации возможно осуществить на основе вырезания спектральных линий путем удаления соответствующих им пиков во временной структуре.

Для обеспечения условий интерференции импульса самого с собой, сдвинутым на временную задержку, меньшую длительности импульса, и последующего формирования последовательности с квазидискретным спектром необходимо использование импульсов с частотной

модуляцией [3].Существует несколько методов создания таких импульсов в ТГц области спектра. Так, за счет распространения фемтосекундных импульсов ИК диапазона в среды со специальной дисперсией показателя преломления (например, в кристаллах ниобата лития с регулярной доменной структурой [4]) генерируется чирпированный сигнал. Кроме того, модуляцию возможно осуществить за счет распространения непосредственно ТГц импульса в волноводе [5]. Чирп в этом случае является экспоненциальным.

Целью работы является исследование зависимости длительности чирпированных терагерцовых импульсов, полученных в полом металлическом волноводе из нержавеющей стали от его геометрических параметров, таких как длина и внутренний диаметр. Исследования проводились на лабораторном ТГц спектрометре с разрешением во времени. Длительность исходного ТГц импульса составляла 2 пс, а средняя мощность 30 мкВт.

Исследование трубок с различным внутренними диаметрами выявило не более чем 50 % изменение длительности ТГц импульса. Она составила 4 пс для трубки с диаметром 2,2 мм; 5,9 пс для 1,6 мм; 5,2 пс для 1,2 мм. Наблюдается рост сигнала после временной отметки в 20 пс, однако по FWHM эта компонента вклада в длительность не вносит.

В тоже время, увеличение длины волновода привело к значительному растяжению ТГц импульса во времени. Так для волновода диаметром 1,6 мм, при увеличении длины от 9 до 23 мм, наблюдается увеличение длительности импульса с 4,8 до 17,6 пс (рис. 1).

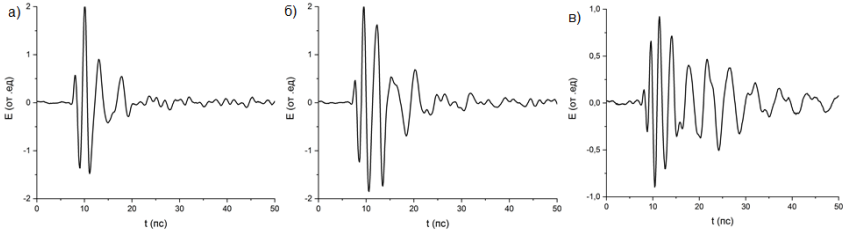


Рис. 1. ТГц импульсы, прошедшие через волноводы диаметром 1,6 мм и длиной: 9 мм (а); 13 мм (б); 26 мм (в)

Список литературы

1. Zhang Z. et. al. // IEEE Veh. Technol. Mag. IEEE. 2019. V. 14. № 3. P. 28-41.
2. Grachev Ya.V. et. al. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2018. V. 30. № 1.
3. Liu X. et.al. // arXiv preprint arXiv:1910.07209. 2019.
4. Lee Y.S., Amer N., Hurlbut W.C. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 2, № 2, P. 170-172.
5. McGowan R.W., Gallot G., Grischkowsky D. // Opt. Lett. 1999. V. 24. № 20. P. 1431-1433.

УДК 535(06)+004(06)

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА ОДНОМОДОВЫХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНЫХ ВОЛНОВОДОВ В СТЕКЛЕ

Проведена разработка интегрально-оптических разветвителей, использующих эффект межмодовой интерференции. В основе разветвителей лежат волноводы в стекле с градиентным профилем показателя преломления. Подобрана оптимальная топология для минимизации вносимых потерь.

M.M. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF SINGLE-MODE OPTICAL MMI COUPLERS, BASED ON GLASS GRADIENT WAVEGUIDES

The design of multimode interference integrated-optic splitters has been made. Splitters are based on waveguides in glass with gradient index profile. Optimal topology for minimum insertion loss is determined.

Цель настоящей работы − разработка одномодовых разветвителей оптического излучения, использующих в основе своего функционирования интерференцию волноводных мод (MMI – multimode interference) в квазипланарном ионообменном волноводе в стекле.

Волноводный MMI-разветвитель состоит из входного одномодового канала, многомодового (квазипланарного) волновода, в котором происходит разделение мощности излучения на части, и выходных одномодовых каналов, имеющих форму S-изгибов. Принцип разделения мощности излучения основан на отображении поперечного распределения электромагнитного поля, входного для многомодового волновода, на набор его идентичных образов, формирующихся на определенной длине волновода за счет интерференции волноводных мод [1]. На рис.1а показана схема разветвителя.

Базовые параметры MMI-разветвителя – длина и ширина многомодового канала, L_{MM} и W_{MM}. На рисунке также обозначены: L_s и D_s − длина S-изгибов и выходное расстояние между волноводами.

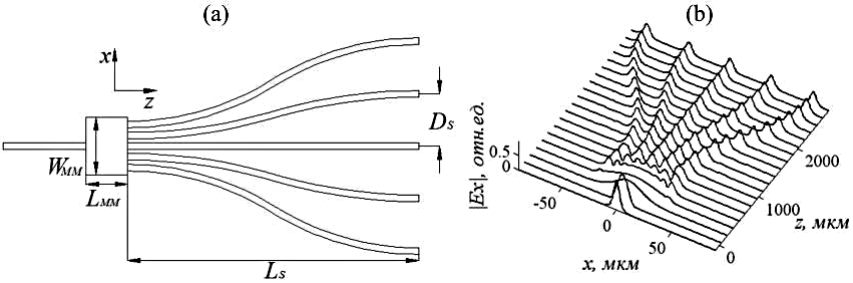


Рис. 1. Схема MMI-разветвителя оптического излучения 1×5 (a), картина распространения оптического излучения в разветвителе (b)

Расчет параметров разветвителя со ступенчатым профилем показателя преломления волноводов производится следующим образом [1]. В волноводе определяется длина биений фундаментальной моды и моды первого порядка: $L_\pi = 4N_{eff}W_{MM}^2 / 3\lambda$, где N_{eff} – эффективный показатель преломления фундаментальной моды, λ – длина волны излучения. Разветвитель *1×N* имеет длину волновода $L_{MM} = 3L_\pi / 4N$.

Параметры волноводов разветвителя соответствуют технологии ионного обмена Ag^+–Na^+ в стекле К-8. Приращение показателя преломления на поверхности – 0,025, длина волны – 1,55 мкм. Ширина и длина многомодового волновода являются предметом оптимизации, проведенной методом распространяющегося пучка, так как волновод градиентный, и приведенные формулы не вполне точны.

Произведен расчет разветвителя 1×5. Длина многомодового волновода составляет 0,8 мм при его ширине 62 мкм. На рис.1b показана картина распространения излучения в разветвителе. Продольная длина S-изгибов L_s для разветвителя 1×5 составляет 6,5 мм для разнесения всех выходных каналов на 250 мкм между собой. Вносимые потери – 0,6 дБ.

Таким образом, проведена разработка разветвителей на основе межмодововой интерференции в ионообменных волноводах в стекле. К достоинствам MMI-разветвителей следует отнести их малые размеры по сравнению с оптическими разветвителями древовидной топологии.

Список литературы

1. Soldano L.B., Pennings E.C.M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications // Journal of Lightwave Technology. 1995. V. 13. N 4. P. 615-627.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ГУЩИН, А.А. ЛЯПИН, М.В. ЧЕРНОВ[1], А.С. ЕРМАКОВ, С.В. КУЗНЕЦОВ[2], П.А. РЯБОЧКИНА, В.Ю. ПРОЙДАКОВА[2], П.П. ФЕДОРОВ[2]

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

[1]ООО «Фотонные технологические системы», Саранск

[2]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ФТОРИДНЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ SrF_2:RE (RE = Er, Tm, Ho, Yb) ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследована апконверсионная люминесценция порошков фторидных люминофоров SrF_2:Er,Yb и SrF_2:Er,Tm синтезированных методом соосаждения из водных растворов. При возбуждении лазерным излучении с длиной волны 1531.8 нм и 1645 нм были зарегистрированы спектры апконверсионной люминесценции в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Исследована зависимость интенсивности апконверсионной люминесценции от концентрации редкоземельных ионов и определены значения абсолютного энергетического выхода апконверсионной люминесценции для диапазонов 380-780 и 380-1100 нм. Рассчитаны значения координат цветностей и коррелированных цветовых температур апконверсионной люминесценции фторидных люминофоров.

S.V. GUSHCHIN, A.A. LYAPIN, M.V. CHERNOV[1], A.S. ERMAKOV, S.V. KUZNETSOV[2], P.A. RYABOCHKINA, V.Yu. PROYDAKOVA[2], P.P. FEDOROV[2]

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev, Saransk

[1]Photon Technology Systems, Saransk

[2]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

FLUORIDE PHOSPHORS SrF_2:RE (RE = Er, Tm, Ho, Yb) FOR UPCONVERSION OF INFRARED RADIATION

In this work, we investigated upconversion luminescence (UCL) fluoride phosphors. Fluorite-type SrF_2:Er,Yb and SrF_2:Er,Tm phosphors were synthesized by using a co-precipitation from aqueous nitrate solution technique. Upon excitation laser radiation with wavelength 1531.8 nm and 1645 nm, the UCL in SrF_2:Er,Yb and SrF_2:Er,Tm phosphors in the visible and near-infrared spectral region were recorded. We have studied the intensity UCL dependent on rare-earth concentration. Also we estimated absolute upconversion luminescence energy yield in the 380-780 and 380-1100 nm spectral ranges. Values of chromaticity coordinates and correlated color temperatures of upconversion luminescence of fluoride phosphors were calculated.

К настоящему времени апконверсионные люминофоры, легированные редкоземельными ионами, активно изучаются множеством научных групп, для применения в биофотонике, лазерной физике, солнечной энергетике, антиконтрафактной защите, переработки пластмассовых изделий и т.д. [1-4]. В настоящей работе объектами исследования являлись концентрационные серии фторидных люминофоров со структурой флюорита SrF_2:Er,Yb и SrF_2:Er,Tm синтезированные методом соосаждения из водных растворов. На рис. 1а представлены спектры отражения ионов Yb^{3+}, Er^{3+} и Tm^{3+} в диапазоне 300-1800 нм, полученные для люминофора SrF_2:Er(5.0%),Yb(1.0%) и SrF_2:Er(2.5%),Tm(0.7%). При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 нм были зарегистрированы спектры апконверсионной люминесценции для люминофоров SrF_2:Er,Yb и SrF_2:Er,Tm соответственно (рис. 1б и 1в).

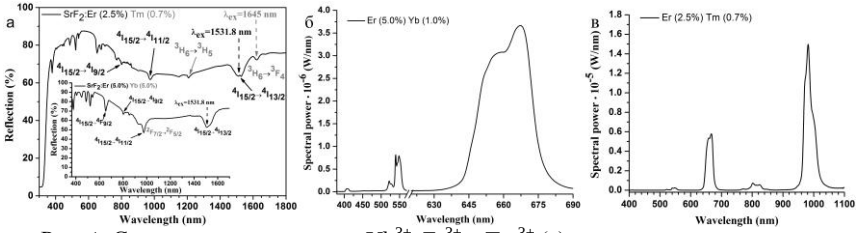


Рис. 1. Спектр отражения ионов Yb^{3+}, Er^{3+} и Tm^{3+} (а); спектральная мощность апконверсионной люминесценции для люминофоров: SrF_2:Er,Yb (б) и SrF_2:Er,Tm(в)

Исследование показало, что люминофоры SrF_2:RE (RE = Er, Tm, Ho, Yb) способны преобразовывать инфракрасное излучение широкого спектрального диапазона в видимую люминесценцию.

Исследование выполнено за счет средств гранта Президента Российской Федерации проект МК 2168.2019.2.

Список литературы

1. Auzel F. // Chem. Rev. 2004. V. 104 (1). P. 139-174.
2. Jaque D., Richard C., et. al. // Adv. Opt. Photonics. 2016. V. 8 (1). P. 1-103.
3. Goldschmidt J.C., Fischer S. // Adv. Opt. Mater. 2015. V.3 (4). P. 510-535.
4. Lyapin A.A., Gushchin S.V., et. al. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8 (7). P. 1863-1869

УДК 535(06)+004(06)

Н.С. СОСНОВА, В.А. ПАРФЕНОВ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕН-ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ТЕМПЕРНОЙ ЖИВОПИСИ

Данный аналитический метод обычно используют для исследования памятников из металлов, а также произведений станковой масляной живописи. В ходе экспериментальных исследований, выполненных авторами, изучалась возможность его применения для исследования темперной живописи, в том числе, русских икон XVI-XIX веков.

N.S. SOSNOVA, V.A. PARFENOV
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

APPLICATION OF X-RAY-FLUORESCENT SPECTROSCOPY FOR RESEARCH OF WORKS OF TEMPER PAINTING

This analytical method is usually used to study monuments of metals, as well as works of easel oil painting. In the course of experimental studies performed by the authors of the report, the possibility of its application for the study of tempera painting, including Russian icons of the 16th-19th centuries, was studied.

Рентген-флуоресцентная спектрометрия (РФА) является одним из наиболее эффективных методов элементного анализа материалов. В последние два десятилетия он стал активно использоваться для исследования памятников истории и культуры, в том числе, для проверки подлинности и датировки отдельных объектов, а также, установления авторства и места их создания.

Цель работы состояла в идентификации пигментов красок при проведении научно-обоснованных реставрационных работ, а также в создании базы данных РФА-спектров пигментов, использованных в разные исторические эпохи при создании икон в различных регионах России.

Полученные результаты исследования отдельных икон позволят перейти к созданию базы данных по РФА-спектрам пигментов.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ В ЗАМУТНЕННОЙ СРЕДЕ

Рассматривается сопряженная с водолазной маской телевизионная система (ТВС) для видения в замутненной воде за счет использования поляризации. Приводятся основные параметры ТВС.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moskovskij Zavod “Sapphir», Moscow

TELEVISION SYSTEM FOR UNDERWATER VIEWING IN TURBID MEDIUM

A television system (TVS) coupled with a diving mask for vision in turbid water through the use of polarization is considered. The main parameters of TVS are given.

Существует большое количество ТВС для подводного видения сопрягаемых с подводными масками драйверов [1, 2]. Недостатком таких ТВС является плохая работа в условиях замутнения водной среды. На рис. 1 представлена блок-схема новой ТВС, для преодоления этого недостатка. ТВС 1 содержит объектив 2 и поляроидный узкополосный фильтр 3. Он выделяет рабочую область спектра 0,51 - 0,53 мкм, оптимальную для работы под водой. Объектив 2 создает изображение объекта наблюдения и окружающего его фона на матрице ПЗС типа EMCCD [3] ТВ камеры 4. Видеосигнал от ТВ камеры 4 передается в OLED дисплей 5, с экрана которого ведется наблюдение. В состав ТВС 1 входит светодиодный осветитель 6. Он содержит объектив формирования излучения (ОФИ) 7, который через поляроидный фильтр 8 оптически сопряжен с мощным светодиодом (СД) 9 зеленого цвета свечения. СД работает от драйвера 10. Питание ТВС 1 и драйвера 10 осуществляются от источника питания 11 с напряжением 9 В. ОФИ 7 коллимирует излучение СД 9 и создает пятно подсвета на объекте наблюдения. При этом плоскости поляризации фильтров 3 и 8 взаимно параллельны. Благодаря этому в ТВС 1 проходит только излучение подсвета, а все неполяризованное излучение, в том числе и излучение обратного рассеяния, отсекается фильтром 3. Благодаря этому по сравнению с обычной ТВС возникает повышение контраста наблюдаемого объекта и

соответственно увеличивается дальность его видения. При замутнении воды дальность видения также резко повышается по сравнению применением обычной ТВС. На рис. 2 показан внешний вид новой ТВС. На рис. 3 наглядно показаны возможности новой ТВС с точки зрения обеспечения видения в замутненной воде. На графиках рис. 3 показана зависимость дальности обнаружения под водой в ТВС стандартного белого диска диаметром 0,5 м, опускаемого в воду с грузом на мерном лине на глубину 15 м от освещенности воды $E_в$ и от коэффициента ε ослабления света в воде. Сплошной линией показана зависимость при использовании эффекта поляризации, пунктиром – при его отсутствии. На графиках рис. 3 кривые 1 – для $\varepsilon = 0{,}03$ м$^{-1}$ (прозрачная вода), 2 – для $\varepsilon = 0{,}06$ м$^{-1}$ (слегка замутненная вода), 3 – для $\varepsilon = 0{,}12$ м$^{-1}$ (средне замутненная вода), 4 – для $\varepsilon = 0{,}2$ м$^{-1}$ (замутненная вода). Из графиков рис. 3. видно преимущество поляризационной селекции объекта, в особенности в мутной воде.

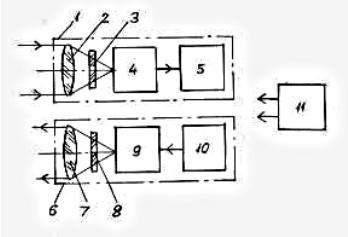


Рис. 1. Блок-схема ТВС

Рис. 2. Внешний вид ТВС на маске дайвера

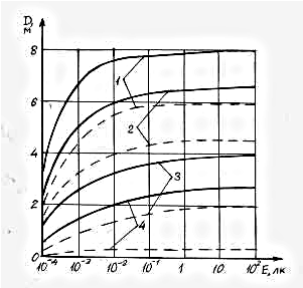


Рис. 3. Зависимость дальности видения от освещенности и от прозрачности водной среды

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: Техносфера, 2014.
3. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности // Системы управления, безопасности и связи. 2016. № 3. С. 65-93.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ГРИГОРЬЕВА, В.А. ПАРФЕНОВ, Н.Л. ЩЕГЛОВА
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АТРИБУЦИИ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ЖИВОПИСИ

В работе приведены примеры экспериментальных исследований цифровых оптических изображений произведений живописи на примере анализа работ некоторых известных художников.

A.N. GRIGORIEVA, V.A. PARFENOV, N.L. SCHEGLOVA
Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

USING COMPUTER METHODS OF PROCESSING DIGITAL OPTICAL IMAGES FOR ATTRIBUTION OF PAINTINGS

Presents the result of experiments on the formation of graphitic conductive cylindrical microstructures in the bulk of polycarbonate (PC) samples by single femtosecond laser pulse. Were determined conditions and the reasons for the formation of elongated graphitized filaments with diameters about 2 mkm and length greater than 1 mm in polycarbonate samples.

Атрибуция произведений живописи является комплексным научным исследованием. Исторически атрибуция картин основывалась исключительно на экспертном мнении искусствоведов, хорошо знающих стиль и технику живописи отдельных художников.

В последние два десятилетия для атрибуции произведений живописи стали активно использовать различные оптофизические методы и технологии. Это позволило сделать атрибуцию более объективным процессом, однако поиск новых подходов решения этих задач по-прежнему является актуальным.

В данной научной работе поставлена задача автоматизации процесса атрибуции через определение закономерностей, способных охарактеризовать художественный почерк живописца, а также разработки новых компьютерных методов, позволяющих проводить исследование цифровых оптических изображений картин.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир», Москва

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ДВУХДИАПАЗОННАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассматривается стереоскопическая двухдиапазонная телевизионная система визуализации изображения (ТВ СВИ), содержащая ТВ камеры и тепловизионные фотоприемные устройства. ТВ СВИ может работать круглосуточно и при любой погоде. Приведены основные параметры ТВ СВИ.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC “Moskovskij Zavod “Sapphir”, Moscow

STEREOSCOPIC DUAL-BAND TELEVISION SYSTEM IMAGING

Discusses stereoscopic 2-band television system imaging (SVI) containing TV camera and thermal-imaging photodetector. TV SVI can work around the clock and in any weather. The basic TV settings SVI.

Стереоскопические ТВ системы визуализации изображения (ТВ СВИ) [1] создают объемное изображение и применяются при технологическом контроле, мониторинге местности, для охраны, поиска, спасения и др. Недостаток таких ТВ СВИ – неспособность работать круглосуточно и при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и др.). На рис. 1 дана блок-схема двухканальной ТВ СВИ, свободной от этих недостатков. СВИ состоит из двух идентичных каналов. В первом канале используется объектив 1. Он содержит ТВ объектив из двух компонентов 2. В первом канале есть также тепловизионный (ТВП) объектив, из двух компонентов 3, первое плоское дихроичное зеркало 4 и фотоприёмное устройством (ФПУ) 6. Видеосигнал с выхода ФПУ 6 усиливается в видеоусилителе 7. Выход ТВ камеры 5 и видеоусилителя 7 подключены соответственно к первому и второму входам блока электронной обработки (БЭО) 8. Второй канал построен так же, как и первый: 9 – объектив, который содержит ТВ объектив из двух компонентов 10. ТВП объектив, состоит из двух компонентов 11. Имеется второе плоское дихроичное зеркало 12. Первый выход БЭО 8 подключен к первому OLED дисплею 16 с правым окуляром 17. Второй выход БЭО 8

подключен ко второму OLED дисплею 18 с левым окуляром 19. Первое и второе дихроичные плоские зеркала пропускают излучение в рабочей области спектра ТВ камер 15 0,4 - 1,1 мкм, а отражают излучение в рабочей области спектра ФПУ 8 - 12 мкм. Сигнал с выхода ФПУ 13 усиливается в видеоусилителе 14. Видеосигналы с выходов ТВ камер 5 и 15, а также с выходов видеоусилителей 7 и 14 поступают в БЭО 8. Здесь формируется единое интегрированное изображение, в нем с помощью микропроцессора «сшиты» наиболее информативные признаки изображений всех каналов. С выходов БЭО 8 видеосигналы поступают в OLED дисплеи 16 и 18. С их экранов стереоскопическое изображение наблюдается через окуляры 17 и 19 правым и левым глазом соответственно. За счет высокочувствительных матриц EMCCD [2] ТВ камер 6 и 15 ТВ СВИ может работать круглосуточно, а за счет ТВП ФПУ 6 и 13 – еще и при пониженной прозрачности атмосферы. ТВ СВИ имеет дальность распознавания ростовой фигуры человека 500 м, угол поля зрения 10 º, массу 2,7 кг. ТВ СВИ работает от аккумуляторной батареи 20 с напряжением 9 В.

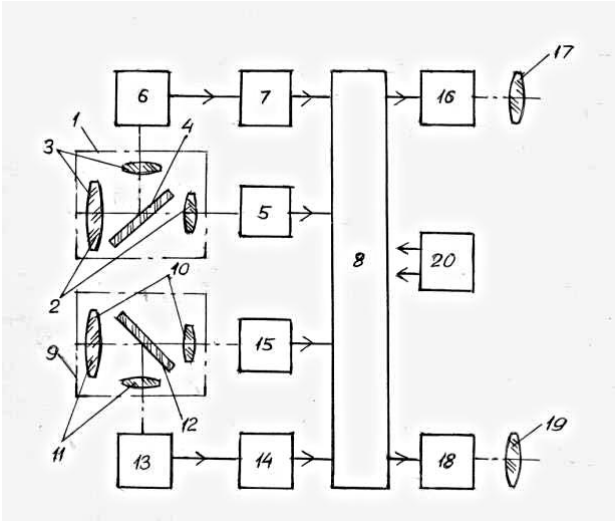


Рис. 1. Блок-схема стереоскопической ТВ СВИ

Список литературы

1. Мамчев Г.В. Особенности построения стереотелевизионных передающих камер // Техника кино и телевидения. 1980. № 11. С. 46-49.

2. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для обеспечения безопасности // Системы управления, безопасности и связи. 2016. № 3. С. 65-93.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. ЕФРЕМЦЕВ, Н.Г. ЕФРЕМЦЕВ, Е.П. ТЕТЕРИН,
П.Е. ТЕТЕРИН[1], В.В. ГАНСОВСКИЙ, А.С. ШНУРОВ[2],
Д.А. РОДИН[2]

Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, Владимирская обл.
[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФОТОГРАФИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Предложена методика использования глубокого обучения сверточных нейронных сетей для трёхуровневой классификации качества цифровых изображений с точки зрения восприятия пользовательской аудиторией с различным разрешением, с использованием различных цветовых схем, а также при варьировании параметров схемы HSV и степени компрессии JPEG. Особенностью методики является возможность классификации изображений, уменьшенных до 100x150 пикселей с точностью не менее 92%.

V.G. EFREMTSEV, N.G. EFREMTSEV, E.P. TETERIN,
P.E. TETERIN[1], V.V. GANSOVSKIY, A.S. SHNUROV[2], D.A. RODIN[2]

Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Vladimir region
[1]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[2]Bauman Moscow State Technical University

DEEP-LEARNING APPLICATION FOR QUALITY EVALUATION OF THE PHOTOSHOOTS

The method of deep learning of convolutional neural networks for 3-layer classification of a perceptional quality of digital images with different resolution and color schemes is suggested. We review the method in dependence on different parameters of HSV color scheme and JPEG compressing. The trained network is able to sort a preview images of a reduced resolution. The evaluation efficiency remains more than 92% effective even with preview size of 100x150 pixels.

В сфере фотографии возможность оценки качества и стоимости получаемого изображения позволяет скорректировать тематику и стиль фотосессии. Экспертное мнение самого фотографа или группы экспертов имеет большой элемент неопределенности и субъективности. Поэтому для решения данного вопроса было предложено применить метод классификации снимков на основе глубокого обучения нейронных сетей

(НС). Для этого был сформирован массив данных, содержащих три класса снимков характеризующиеся высоким, среднем и низким уровнем продаж. Разделение снимков на три указанных класса определялось автором снимков на основе данных, полученных с Интернет-ресурсов, специализирующихся на продаже снимков. Всего анализировалось 600 снимков, которые были представлены в формате JPEG размером 100x150 пикселей. Предварительно было получено, что при использовании одного и того же фильтра для изменения размера для всех снимков вплоть до указанного размера, потери точности классификации не происходит. Все снимки были нормированы и подвергались операциям вращения, сдвига и прочим трансформациям.

Для анализа снимков применялись сверточные сети с различным количеством скрытых слоев и фильтров. В качестве критерия, определяющего качество классификации, использовался параметр точности (accuracy), который показывал долю верно классифицированных снимков по тестовому массиву. Исследовалось влияние различных параметров на точность классификации – цветовой схемы, насыщенности, сдвига цветового тона, а также степени компрессии JPEG. Проведенные расчеты показали, что ансамбль из трёх двухслойных НС позволяют соотносить фотоснимки по трем классам со значением точности, равное 92%.

Высокие значения точности, полученные при различных количествах образцов в обучающей выборке, свидетельствует об оптимальности выбранной архитектуры НС и подобранных гиперпараметров и достаточном количестве снимков. Хорошая воспроизводимость значений точности при многократном повторении расчетов с включением различных снимков в обучающую и тестовую выборки при каждом расчете, также подтверждает надежной работы НС.

УДК 535(06)+004(06)

У.В. ЮРИНА, А.И. СИДОРОВ[1,2], О.А. ПОДСВИРОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКОЛ И КРИСТАЛЛОВ

Приведены экспериментальные результаты влияния облучения электронами с энергией 5 - 50 кэВ на стекла с ионами металлов, щелочно-галоидные кристаллы и стекла с металлической пленкой. Показано, что варьирование энергии электронов позволяет формировать такие оптические микро- и наноэлементы, как зеркала, волноводы, в том числе, плазмонные, градиентные линзы, люминесцентные источники света, оптические фильтры и др.

U.V. YURINA, A.I. SIDOROV[1,2], O.A. PODSVIROV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"

ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES FOR THE FABRICATION OF OPTICAL MICRO- AND NANOELEMENTS ON THE SURFACE OF GLASSES AND CRYSTALS

The results of experimental study of alkaline-halide crystals, glasses with metal ions and glasses with a metal film, modified by electron irradiation with energy E = 5 and 50 keV are presented It is shown that varying the electron energy allows the formation of such optical micro- and nanoelements as mirrors, waveguides, including plasmon, gradient lenses, fluorescent light sources, optical filters, etc.

Стекла и кристаллы широко применяются для изготовления различных оптических микроэлементов для фотонных устройств – волноводов, линз, дифракционных решеток и т.д. Воздействие электронного пучка на поверхность оптических материалов приводит к локальной модификации приповерхностных слоев – изменению состава, структуры, кристаллизации, механических и оптических свойств. Основными процессами при этом являются: 1) разрыв химических связей материала и

изменение его структуры; 2) ионизация компонентов материала быстрыми электронами и восстановление ионов термализованными электронами; 3) полевая миграция подвижных положительных ионов металла в область отрицательного заряда; 4) локальный нагрев приповерхностных слоев материала электронным лучом. В зависимости от энергии электронов и состава материала это позволяет локально изменять его оптические свойства. Учитывая то, что электронный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром менее 10 нм, появляется возможность создавать оптические микро- и наноэлементы на поверхности диэлектриков и в приповерхностных слоях. Целью настоящей работы было исследование возможностей создания оптических микро- и наноэлементов на поверхности стекол и кристаллов локальным воздействием сфокусированного электронного луча. Эксперименты показали, что при облучении электронами стекол, содержащих ионы натрия или калия, в зоне облучения происходит увеличение показателя преломления с $\Delta n = 0.01 - 0.04$. Причиной этого является изменение структуры стекла и полевая миграция подвижных положительных ионов металла в облученную зону. Это позволяет создавать в приповерхностных слоях стекла градиентные линзы и оптические волноводы.

При облучении тонких (30 - 50 нм) пленок металла (Ag, Au, Cu, Al) электронами с энергией более 20 кэВ в металлической пленке возникает микро/наноотверстие из-за полевой миграции ионов металла из пленки вглубь стекла. Когда энергия электронов не превышает 5 кэВ, полевая миграция ионов металла происходит по поверхности пленки. При этом толщина пленки в облученной зоне увеличивается, а толщина окружающей пленки уменьшается. После частичного химического травления пленки на поверхности стекла остаются островки металла, имеющие форму облученной зона. Такие островки могут быть использованы как микро/нано зеркала или как плазмонные волноводы.

Аналогичный эффект наблюдается при электронном облучении серебросодержащих стекол электронами относительно низкой энергии. Ионы серебра под действием электрического поля мигрируют на поверхность стекла, формируя на ней сплошную пленку металла.

При облучении серебросодержащих стекол, а также кристаллов, содержащих ионы щелочных или щелочноземельных металлов, в них формируются металлические наночастицы, обладающие плазмонным резонансом. Это приводит к локальному окрашиванию материала в синий, фиолетовый, желтый, красный или черный цвета. Это позволяет создавать оптические микрофильтры.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. САНИНА[1], О.С. КУДАЕВ[1], А.И. СИДОРОВ[1,2]
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ИДЕАЛЬНЫЕ ПОГЛОТИТЕЛИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ В СТЕКЛАХ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Проведен синтез нанокомпозитов на основе наночастиц (НЧ) Ag, Ag_2S и CuS в сплошных и нанопористых силикатных стеклах. Исследованы спектральные характеристики нанокомпозитов, с точки зрения возможности их применение в качестве идеальных поглотителей. Показано, что данные материалы перспективны для применения в солнечных элементах с термоэлектрическими преобразователями.

V.A. SANINA[1], O.S. KUDAEV[1], A.I. SIDOROV[1,2]
[1]*Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*

PERFECT ABSORBERS ON BASE OF METAL AND SEMICONDUCTOR NANOPARTICLES IN GLASSES FOR SOLAR ENERGY APPLICATION

The synthesis of nanocomposites on base of Ag, Ag_2S and CuS nanoparticles in solid and nanoporous silicate glasses was performed. The spectral characteristics of nanocomposites were studied, from a point of view of their application as perfect absorbers. It is shown that such materials are promising for the use in solar cells with thermoelectric converter.

Идеальные поглотители широко используются в фотонике, в частности, в солнечной энергетике [1]. Целью настоящей работы было исследование оптических свойств нанокомпозитов в виде НЧ Ag, а также Ag_2S и CuS с точки зрения их использования в солнечной энергетике.

В сплошные силикатные стекла серебро вводилось методом ионного обмена [2]. Для формирования НЧ Ag проводилась термообработка стекол. В нанопористых стеклах с размером пор 25 нм НЧ Ag формировались фотолизом $AgNO_3$ с последующей термообработкой. AgS и CuS в порах стекла формировались путем сульфидирования нанокристаллов $AgNO_3$ и

$CuSO_4$ в порах стекла раствором сульфида натрия с последующим удалением растворимых продуктов реакции.

На рис. 1 показан спектр оптической плотности сплошного силикатного стекла с НЧ Ag. Следует отметить, что при вводе серебра в стекло методом ионного обмена НЧ Ag располагаются в приповерхностных слоях стекла толщиной 30 мкм. Из рисунка видно, что оптическая плотность в спектральном интервале 250 - 500 нм превышает 6, и на отдельных участках спектра достигает 8. В спектральном интервале 600 - 900 нм оптическая плотность лежит в диапазоне 2 - 0.5. Высокое поглощение стекла в спектральном интервале 250 - 500 нм связано с плазменными резонансами НЧ Ag [3]. Известно, что сферическая НЧ Ag в силикатном стекле имеет плазмонный резонанс и соответствующую ему узкую полосу поглощения в интервале 400-410 нм. Значительное уширение полосы поглощения и наличие на ней нескольких выраженных полос связано с тем, что НЧ Ag в стекле имеют большой разброс по форме и размерам, что приводит к появлению большого количества плазмонных резонансов на разных длинах волн. Дополнительные плазмонные резонансы могут возникать и в результате электромагнитного взаимодействия между НЧ [3]. Вклад в оптическую плотность вносит, также, и многократное рассеяние света на НЧ.

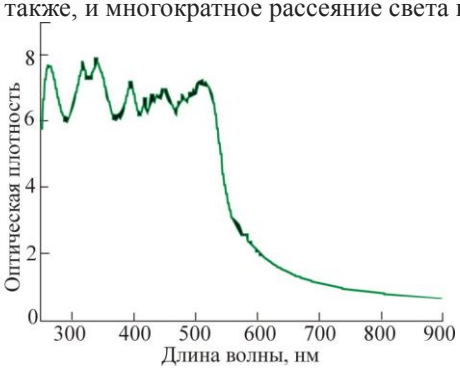


Рис. 1. Спектр оптической плотности сплошного стекла с серебром

Таким образом, высокое поглощение стекол с наночастицами серебра в коротковолновой области спектра позволяет эффективно преобразовывать коротковолновое излучение.

Список литературы

1. Molesky S., Dewalt C.J., Jacob Z. // Opt. Express. 2013. V. 21. P. A96.
2. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. // Opt. Eng. 2011. V. 50. P. 071107.
3. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. КИРПИЧЕНКО, А.И. СИДОРОВ[1,2], О.А. ПОДСВИРОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

В работе исследованы кварцевые стекла КУ-2 модифицированные электронным облучением на установке электронной сварки JEBD-2 с энергией 50 кэВ, плотностью тока 50 мкА/см^2 и дозами 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 и 100 мКл/см^2. В качестве полученных результатов приведены спектры оптической плотности в диапазоне 350-700 нм и комбинационного рассеяния в диапазоне 250 - 1250 см$^{-1}$.

D.A. KIRPICHENKO, A.I. SIDOROV[1,2], O.A. PODSVIROV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
[1]ITMO University, Saint-Petersburg
[2]Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"

INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON THE OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF QUARTZ GLASS

In this work, KU-2 quartz glasses of amorphous structure modified by electron irradiation were studied on a JEBD-2 electron welding machine with an energy of 50 keV, a current density of 50 μA / cm^2 and doses of 5-100 mC / cm^2. As the obtained results, optical density spectra in the range of 350-700 nm and Raman scattering in the range of 250 - 1250 cm^{-1} are given.

Кварцевое стекло – один из самых популярных материалов, используемых в различных отраслях производства. Вследствие широкого круга применения данного материала особенно интересно исследование его свойств в результате различных внешних воздействий. Ранее было проведено множество исследований по электронному облучению. Например, в работе [1] представлены результаты исследований силикатных стекол, облученных электронами и содержащих добавки в виде различных металлов.

В данной работе рассматривается возможность модификации оптических и структурных свойств оптического кварцевого стекла путем электронного облучения с энергией 50 кэВ, плотностью тока 50 мкА/см^2 и дозами 5 - 100 мКл/см^2.

Электронное облучение при различных дозах слабо влияет на поглощение стекла (рис. 1). Происходит возникновение слабых полос поглощения при 335 нм, соответсвующая ТЕ-центру, который представляет собой ловушку для электронов, и 470 нм - возникновение дырочного центра с немостиковым кислородом (ВО).

Спектры комбинационного рассеяния, приведенные на рис. 2, показали, что при увеличении дозы электронного облучения происходит изменение структуры образца, а именно:

- увеличиваются колебания структурных единиц, составляющих кварцевое стекло, которые соответствуют своим полосам на

415 см$^{-1}$ – колебания Si-O-Si в 4-, 5- и 6-элементных силоксановых кольцах;

800 см$^{-1}$ – симметричная мода растяжения в анионной структурной единице $(SiO_4)^{4-}$;

1000 см$^{-1}$ – колебательная мода SiO-BO в неполностью поляризованных Q^2 и Q^3;

- при увеличении дозы от 40 мКл/см^2 появляется еще одна полоса на 600 см$^{-1}$ соответствующая симметричным колебательным модам в 3- и 4-элементных силоксановых кольцах.

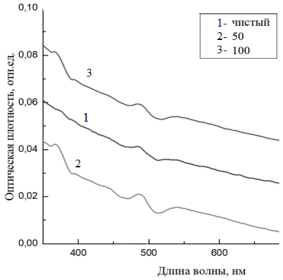


Рис. 1. Спектры оптической плотности образца с дозами 50, 100 мКл/см^2 и необлученного образца

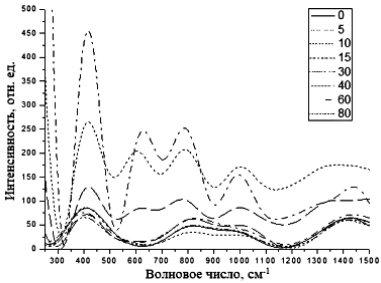


Рис. 2. Спектр рамановского рассеяния кварцевого стекла и необлученного образца, в легенде указаны значения доз

Список литературы

1. Брунов В.С., Подсвиров О.А., Сидоров А.И., Чураев Д.В. Формирование тонких пленок и наночастиц серебра в серебросодержащих стеклах и на их поверхности при электронном облучении // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 8. С. 112-117.

УДК 535(06)+004(06)

К.В. ОРЕШКИНА, В.Д. ДУБРОВИН, Н.В. НИКОНОРОВ,
Е.М. СГИБНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

БОРОГЕРМАНАТНЫЕ СТЕКЛА С НАНОКРИСТАЛЛАМИ ПЕРОВСКИТОВ

В работе были разработаны и синтезированы борогерманатные стекла, содержащие в своем объеме нанокристаллы перовскитов. Представлены результаты исследования спектрально-люминесцентные свойства полученных стеклокерамик.

K.V. ORESHKINA, V.D. DUBROVIN, N.V. NIKONOROV,
Ye.M. SGIBNEV
ITMO University, Saint-Petersburg

BOROGERMANATE GLASSES DOPED WITH PEROVSKITE NANOCRYSTALS

Borogermanate glasses containing perovskite nanocrystals were developed and synthesized in this work. Spectral-luminescent properties of obtained glass-ceramics were studied.

Одним из самых распространённых способов получения белого света является использование синего светодиода, покрытого желтым или красным и зеленым фосфорами, находящимися в органической матрице [1]. Поскольку светодиоды с органическими компонентами обладают низкой термической стойкостью и стабильностью, создание фосфоров в стеклянных матрицах является актуальной задачей, привлекающей внимание ученых по всему миру. В данной работе были изучены спектрально-люминесцентные свойства борогерманатных стекол с нанокристаллами перовскитов, обладающих узкой люминесценцией в видимом диапазоне.

Для проведения исследований были синтезированы стекла GeO_2 - B_2O_3 – ZnO - Na_2O системы, содержащие в своем составе ионы Cs^+, Pb^{2+} и Hal^-(Hal = Cl, Br, I). Синтез стекол проводился при температуре 1000 °C в воздушной атмосфере в кварцевых тиглях с перемешиванием расплава платиновой мешалкой. Температура стеклования была измерена с помощью дифференциального сканирующего калориметра и составила 450 °C для всех стекол. Образцы термообрабатывались в градиентной

печи при температурах ниже и выше температуры стеклования. Длительность термообработки для всех образцов варьировалась от 15 минут до 5 часов. Спектры поглощения и люминесценции были измерены на всех этапах эксперимента.

Исходные нетермообработанные стекла прозрачны во всем видимом диапазоне от 350 до 800 нм и не обладают люминесценцией при возбуждении УФ излучением. Термообработка при температурах выше температуры стеклования приводит к формированию в стеклах нанокристаллов перовскитов вида $CsPbHal_3$ (Hal = Cl, Br, I). Как известно, ширина запрещенной зоны таких нанокристаллов зависит от их размера [2], что было продемонстрировано в спектрах поглощения исследуемых образцов. В спектрах люминесценции термообработанных стекол наблюдается появление узкой полосы люминесценции. Положение полосы люминесценции не зависит от длины волны возбуждающего света, а определяется только химическим составом и размером нанокристаллов перовскитов. Возможность формирования таких нанокристаллов в стекле открывает перспективы создания на их основе высокоэффективных узкополосных источников излучения, перекрывающих весь видимый диапазон. При этом отличительной чертой стекол с нанокристаллами перовскитов по сравнению с растворами и пленками, содержащими такие нанокристаллы, является их стабильность, что позволяет использовать данные стекла в промышленных задачах.

В результате исследований были изучены спектрально-люминесцентные свойства борогерманатных стекол, содержащих в своем объеме нанокристаллы перовскитов вида $CsPbHal_3$ (Hal = Cl, Br, I. Таким образом, разработанные стеклокерамики являются перспективным материалом для разработки на их основе белых светодиодов.

Список литературы

1. Jang E., Jun S. et. al. // Advanced Materials. 2010. V. 22. P. 3076-3080.

2. Brennan M.C., Herr J.E. et. al. // Journal of the American Chemical Society. 2017. V. 35. P. 12201-12208.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. БАБКИНА, Я.Б. ЕГОРОВА, К.С. ЗЫРЯНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СМЕШАННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CuCl – CuBr В БОРАТНОМ СТЕКЛЕ

Представлены спектры экситонного поглощения чистых и смешанных нанокристалов CuCl и CuBr, распределенных в калиево-алюмо-боратном стекле, при температуре кипения жидкого азота. Приведены расчеты среднего размера выделенных в процессе термообработки кристаллов. Показано, что с увеличением температуры термообработки средний размер нанокристаллов увеличивается.

A.N. BABKINA, Ya.B. EGOROVA, K.S. ZYRYANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF SPECTRAL PROPERTIES OF MIXED CuCl – CuBr NANOCRYSTALS IN BORATE GLASS

The exciton absorption spectra of pure and mixed CuCl and CuBr nanocrystals distributed in potassium – aluminum – borate glass are obtained at liquid nitrogen boiling point. Calculations of the mean size of crystals nucleated during heat treatment are presented. It is shown that with an increase in the heat treatment temperature, the mean nanocrystal size increases.

Наиболее известными аморфными материалами, активированными нанокристаллами галогенидов меди, являются стекла боросиликатной матрицы. Они хорошо изучены благодаря своим фотохромным свойствам [1]. На основе представлений о механизмах формирования и свойствах фотохромных галоидомедных кристаллов разработаны стекла калиево-алюмо-боратной системы следующего состава: 17,86 K_2O - 22,77 Al_2O_3 - 44,66 B_2O_3 - 4,47 SiO_2 - 3,19 P_2O_5 - 1,31 Na_2O - 5,25 F^- (мас %). Сверх 100 мас.% для последующей нуклеации в матрице стекла кристаллов CuCl, CuBr и CuCl-CuBr были введены 3 Cu_2O и 3,3 NaCl, 2,98 KBr, 2,48 NaCl - 2,24 KBr (мас.%) соответственно. Синтез стекла производился при температуре 1290 °C в корундовом тигле с перемешиванием расплава платиново-родиевой мешалкой в течение 60 минут. Выделение в матрице стекла нанокристаллов галогенидов меди происходило в процессе охлаждения после изотермического прогрева образцов стекол при температурах, превышающих или равных температуре стеклования

(T_g = 390 °C). Процесс выделения полупроводниковых нанокристаллов в стёклах описывается диффузионным механизмом фазового распада пересыщенного твердого раствора [2]. Температура изотермической обработки напрямую влияет на средний размер выделяемых нанокристаллов. В связи с тем, что размеры составляют порядка нескольких нанометров, они влияют на ширину запрещенной зоны и энергию экситонных абсорбционных переходов [3]. Это отражается на положении экситонных полос на спектрах поглощения стекол (рис. 1), зарегистрированных при температуре кипения жидкого азота. Верхним экситонным уровнем вблизи потолка валентной зоны кристаллов CuBr является четырёхкратно вырожденный уровень $Z_{1,2}$ («z» означает структуру цинковой обманки, которая является стабильной модификацией кристаллов галогенидов меди при комнатной температуре), а нижним – двукратновырожденный уровень Z_3. Для кристаллов CuCl наблюдается обратная ситуация с расположением экситонных уровней [4]. При выделении смешанных кристаллов в матрице стекла на спектрах поглощения проявляются как экситонные переходы кристаллов CuCl, так и кристаллов CuBr. При этом их спектральное положение является промежуточным по сравнению с расположением экситонных переходов в чисто хлоридных (370 – 390 нм) и чисто бромидных кристаллах (400 - 410 нм). Этот эффект свидетельствует о сложной структуре энергетических зон смешанных кристаллов.

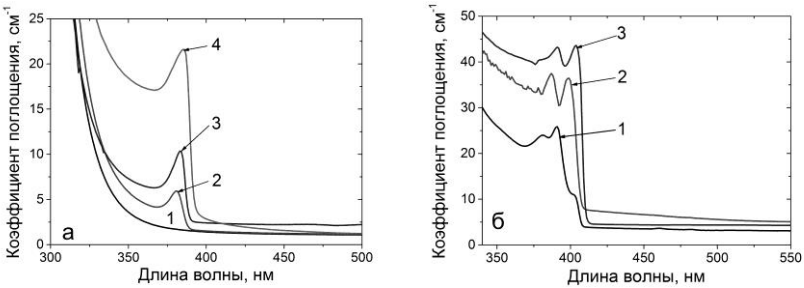


Рис. 1. Спектры поглощения стекол с нанокристаллами CuCl (а) и CuBr (б) после термообработок при температурах 390 (1), 410 (2), 430 (3) и 450 °C(4)

Список литературы

1. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. // CRC Press, 1998. P. 187.
2. Ekimov A. // J. Lumin. 1996. V. 70. P. 1-20.
3. Валов П.М., Лейман В.И. // ФТТ. 1999. Т. 41. С. 310-318.
4. Goldmann A. // Phys. Stat. Sol. 1977. V. 81. P. 9-47.

УДК 535(06)+004(06)

Н.К. КУЗЬМЕНКО, В.А. АСЕЕВ, Ю.К. ФЁДОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ИОНОВ ЭРБИЯ В ЩЕЛОЧНОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛАХ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ

В работе представлены результаты исследования влияния различных добавок на спектрально-люминесцентные свойства щелочногерманатных стекол и стеклокерамик, легированных эрбием в широком температурном диапазоне (293 - 793 K). Рассчитаны значения чувствительности люминесценции.

N.K. KUZMENKO, V.A. ASEEV, Yu.K. FEDOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF THE SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF ERBIUM IONS IN ALKALI-GERMANATE GLASSES FOR OPTICAL TEMPERATURE SENSORS

The work presents the results of a study of the effect of various additives on the spectral-luminescent properties of alkali germanate glasses and glass ceramics doped with erbium in a wide temperature range (293 - 793 K). The luminescence sensitivity values are calculated.

Расширение температурного диапазона работы люминесцентных датчиков и увеличение их чувствительности требует создания новых материалов, способных проявлять зависимость люминесцентных свойств от температуры [1]. Интерес представляют стекла и керамики, легированные редкоземельными элементами, в частности иттербий-эрбиевой парой [2]. Известные на сегодняшний день материалы характеризуются небольшим температурным диапазоном и высокой энергией фононов. Оптические датчики находят своё применение в нефтехимии, биомедицине, энергетике, металлургии, химической промышленности.

В данной работе были исследованы щелочногерманатные стекла системы $59GeO_2 - 28Na_2O - 9Yb_2O_3 - 4La_2O_3 - 0.25Er_2O_3$ мол% и стеклокерамики на их основе, легированные Yb^{3+}/Er^{3+}. В два стекла дополнительно вводились оксиды ниобия или алюминия, одно имело исходный состав. Для получения стеклокерамик была проведена

термообработка исследуемых стекол при температуре 850˚ С в течение 15 минут. Для исходных стекол и полученных стеклокерамик были измерены спектры апконверсионной люминесценции в видимой области спектра от комнатной температуры до 500˚ С с шагом 10˚ С.

С помощью полученных спектров была рассчитана температурная чувствительность люминесценции S (формула (1)) [3]:

$$S = \frac{dR}{dT} = R\left(\frac{\Delta E}{kT^2}\right), \quad (1)$$

где R – отношение интегральных интенсивностей люминесценции переходов $^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ соответственно; ΔE – энергетический зазор между уровнями, T – температура, k – постоянная Больцмана. Полученные зависимости представлены на рис. 1 и 2.

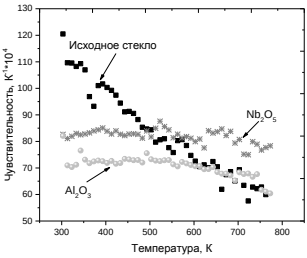


Рис. 1. Зависимость чувствительности люминесценции от температуры для стекол

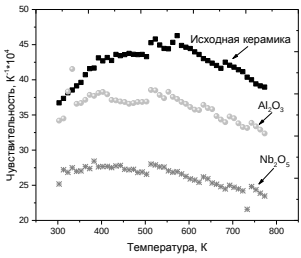


Рис. 2. Зависимость чувствительности люминесценции от температуры для керамик

В результате было получено максимальное значение чувствительности $S_{max} = 120*10^{-4}$ K^{-1} при T = 40 К для исходного стекла. Значения чувствительности для керамик оказались ниже, чем для стекол с аналогичными составами.

Список литературы

1. Allison S.W., Gillies G.T. // Rev. Sci. Instrum., 1997. V.68. P. 2615-2650.
2. Nunes L.A.O., Silva J.F. et. al. // J. Phys. Condens. Matter. 2007. V. 19. P. 209-246.
3. Wade S.A., Collins S.F., Baxter G.W. // Journal of Applied Physics, 2003. V. 94. P. 4743-4756.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА, Е.В. КУЛЬПИНА,
Р.К. НУРЫЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ХРОМСОДЕРЖАЩЕЙ БОРАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ

В работе показано, что при проведении термообработки боратного стекла, легированного ионами лития и хрома, происходит формирование боратной стеклокерамики с выделением в матрице кристаллов $LiAl_7B_4O_{17}$. При увеличении температуры термообработки при синтезе боратной стеклокерамики из исходного стекла средний размер выделяемых кристаллов $LiAl_7B_4O_{17}$:Cr^{3+} увеличивается от 14 до 30 нм. В связи с этим происходит увеличение квантового выхода люминесценции ионов Cr^{3+}, входящих в состав кристаллов вместо ионов Al^{3+}, от 13 до 49 %.

A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA, E.V. KULPINA, R.K. NURYEV
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THERMAL TREATMENT CONDITIONS EFFECT ON THE LUMINESCENT PROPERTIES OF CHROMIUM-DOPED BORATE GLASS-CERAMICS

The paper is dedicated to synthesis of borate glass ceramics via volume crystallization of initial borate glass doped with lithium and chromium ions. During the synthesis, the formation of a large number of $LiAl_7B_4O_{17}$ crystals in the matrix is occurred. Increasing the heat treatment temperature leads to increase of the mean size of the $LiAl_7B_4O_{17}$:Cr^{3+} crystals from 14 to 30 nm. In this regard, the luminescence quantum yield of Cr^{3+} ions, which substitute Al^{3+} ions in crystal structure, increases from 13 to 49 %.

Объектом исследования в данной работе было щелочно-алюмоборатное стекло, матрица которого имела следующей состав: 12,5 Li_2O – 12,5 K_2O – 25 Al_2O_3 – 50 B_2O_3 (мол. %). В качестве добавки была введена окись хрома 0,075 % Cr_2O_3. При облучении полученного стекла излучением из диапазона 550 - 600 нм стекло демонстрирует малоинтенсивную широкую люминесценцию в области 750 - 850 нм с временем жизни порядка 1 мс. В ходе проведения изотермической обработки (ТО) исходного стекла происходит формирование

наностеклокерамики на его основе с выделением в матрице нанокристаллической фазы состава $LiAl_7B_4O_{17}:Cr^{3+}$ [1]. Для подтверждения этого были проведены исследования люминесцентных свойств полученных стеклокерамик. При возбуждении излучением с длиной волны 532 нм стеклокерамика демонстрирует спектр люминесценции, состоящий из трёх полос, расположенных в области 685, 700 и 715 нм. Для каждой из этих полос было измерено время жизни и определен общий квантовый выход люминесценции при разных температурах и длительностях термообработки. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2. Совместно с этим были проведены исследования методом дифракции рентгеновских лучей и определены средние размеры выделенных нанокристаллов.

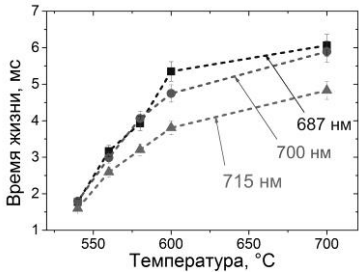


Рис. 1. Зависимость времени жизни для разных полос люминесценции от температуры ТО (t = 1 час)

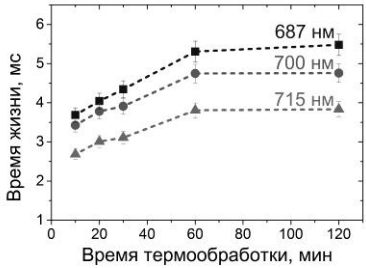


Рис. 2. Зависимость времени жизни для разных полос люминесценции от длительности ТО (T = 600 ºC)

В результате исследований получено, что при увеличении температуры термообработки средний размер кристаллов $LiAl_7B_4O_{17}$ увеличивается от 14 до 30 нм. При этом квантовый выход люминесценции увеличивается от 13 до 49 %, а время жизни – от 1,5 до 6 мс. Кривые затухания люминесценции имеют двухэкспоненциальный характер с первой короткой составляющей и второй длинной составляющей. Увеличение длительности термообработки более 1 часа оказывает незначительное влияние на характеристики люминесценции и параметры кристаллической фазы, выделенной в стеклокерамике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00780.

Список литературы

1. Babkina A.N., Zyryanova K.S. et. al. // J. Non. Cryst. Solids. 2019. V. 521. P. 119487.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.А. ШЕСТОПАЛОВА, В.Д. ДУБРОВИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ С ДОБАВЛЕНИЕМ ЛИТИЯ

В данной работе представлены результаты исследования влияния концентрации серебра на спектрально-люминесцентные свойства ФТР стекол, содержащих литий в составе фототерморефрактивных стекол. Было показано, что обработка данных стекол ультрафиолетовым излучением с последующей термообработкой, приводит к формированию серебряных молекулярных кластеров, обладающих люминесценцией в видимой области.

Yu.A. SHESTOPALOVA, V.D. DUBROVIN
ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH OF SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES DOPED WITH LITHIUM

Presents the results of researches of the effect of silver concentration on spectral and luminescent properties of photo-thermo-refractive (PTR) glasses. Were shown that influence of ultraviolet irradiation followed by heat treatment leads to the formation of silver molecular clusters, which have luminescence in the visible region.

Фототерморефрактивные (ФТР) стекла являются многокомпонентным фоточувствительным материалом, с добавлением Ce, Sb, Ag и галогенидов (F, Cl,Br). УФ облучение и термообработка выше температуры стеклования (ТО) которых приводит к выделению наночастиц серебра в объеме стекла, а затем на них вырастает кристаллическая фаза из галогенидов серебра и фторида натрия.

Серебряные молекулярные кластеры (СМК) – комплексы, которые состоят из нескольких атомов серебра (1 - 15) с различными физико-химическими свойствами, отличающиеся от свойств металлического серебра. Люминесценция СМК находится в спектральном диапазоне от УФ до ИК. СМК являются перспективным материалом для люминесцентных источников белого свечения, дисплеев, биосовместимых маркеров, даунконверторов для увеличения КПД солнечных модулей [1].

Целью работы является исследование влияния концентрации серебра на спектрально-люминесцентные свойства ФТР стекол, содержащих литий. Для проведения исследований были синтезированы ФТР стекла Na_2O - Al_2O_3 - ZnO - SiO_2 системы с добавлением CeO_2, Sb_2O_5 и переменным содержанием Ag_2O и NaCl (с добавлением 0,065 мол. % Ag_2O и 2,2 NaCl мол.%, 0,065 мол. % Ag_2O и 0 NaCl мол. %, 0,14 мол. % Ag_2O и 0 NaCl мол.%, 0,19 Ag_2O и 0 NaCl мол.%). Образцами являются плоскопараллельные пластины толщиной 1 мм, которые облучались ртутной лампой в течении 10 мин., а затем последовательно термообрабатывались в печи при температурах 250 ºС – 400 ºС 1 час.

После УФ облучения в образцах увеличивается коэффициент поглощения в диапазоне 350 - 500 нм в связи с формированием серебряных молекулярных комплексов (СМК) Ag_n. Термообработка ниже T_g увеличивает число СМК (рис. 1 и 2), которые обладают люминесценцией в видимом и ближнем ИК диапазонах [2, 3]. Также видно, что при увеличении концентрации серебра меняется положение максимума люминесценции молекулярных кластеров.

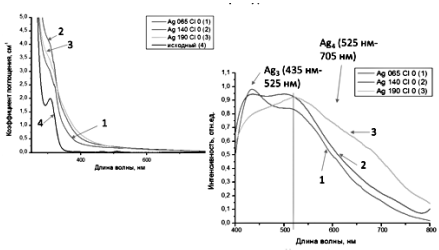


Рис. 1. Образцы с различным содержанием серебра после УФ облучения и термообработки при температуре 250 °С

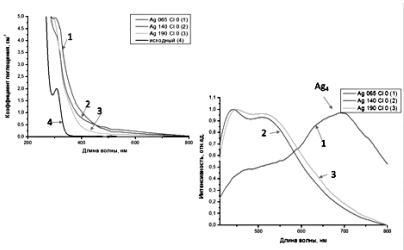


Рис. 2. Образцы с различным содержанием серебра после УФ облучения и термообработки при температуре 350 °С

Список литературы

1. Choi S., Dickson M., Yu J. Developing luminescent silver nanodots for biological applications // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. P. 1867-1891.

2. Fedrigo S., Harbich W., Buttet J. Optical response of Ag2, Ag3, Au2, and Au3 inargonmatrices // J. Chem. Phys. 1993. V. 99. No. 2. P. 5712-5717.

3. Tikhomirov V.K., Rodríguez V.D., Kuznetsov A. et. al. Preparation and luminescence of bulk oxyfluoride glasses doped with Ag nanoclusters // Opt. Exp. 2010. V. 18. No. 21. P. 22032-22040.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ОВЕЧЕНКО, А.П. БОЙЧЕНКО, Д.В. ШАЙТАНОВ,
О.В. КЛЕВЦОВ
Кубанский государственный университет, Краснодар

КИНЕТИКА СВЕЧЕНИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ПРОЦЕССЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АНОДИРОВАННОГО Al_2O_3

На примере сформированного в дистиллированной воде Al_2O_3 показана возможность его преобразования под действием плазмы барьерного разряда, интенсивность свечения которого при этом уменьшается. Установлено, что результатом такого взаимодействия является трансформация Al_2O_3 в сферические частицы диаметром 1–2 μm с неоднородной структурой.

D.S. OVECHENKO, A.P. BOYCHENKO, D.V. SHAYTANOV,
O.V. KLEVTSOV
Kuban State University, Krasnodar

KINETICS OF GLOW OF BARRIER DISCHARGE DURING THE TRANSFORMATION OF ANODIZED Al_2O_3

The example of Al_2O_3 formed in distilled water shows the possibility of its transformation under the influence of a plasma of a barrier discharge, the luminescence intensity of which decreases. It was established that the result of this interaction is the transformation of Al_2O_3 into spherical particles with a diameter of 1–2 μm with an inhomogeneous structure.

В работе [1] были выполнены обширные исследования по анодированию тонких пленок и монолитных металлов в плазме тлеющего разряда. По его вольт-амперным характеристикам и росту оксидных пленок металлов автор пришел к выводу об аналогии газоразрядного анодирования анодированию в водных растворах электролитов [1]. С целью уточнения такой аналогии были проведены исследования с обратной задачей: плазменному травлению (ПТ) барьерным газовым разрядом (БГР) пленки оксида алюминия (Al_2O_3) 15 μm толщины, предварительно сформированной за 1700 s на Al-проволоке чистотой 99.999% в дистиллированной воде по ранее описанной методике [2, 3]. БГР возбуждался в воздухе атмосферного давления в цилиндрическом конденсаторе из стекла экспоненциально затухающими радиоимпульсами амплитудой ~28 kV, частотами их заполнения 200 kHz и следования 1 kHz. Травление велось в течение времени t = 300 s с одновременной

регистрацией интенсивности свечения разряда I (в условных единицах) на длине волны 337.1 nm, принадлежащей ко второй положительной системе молекулярного азота. На рис. 1 представлена кинетика изменения $I(t)$ БГР за период травления Al_2O_3 и РЭМ-изображение поверхности после него.

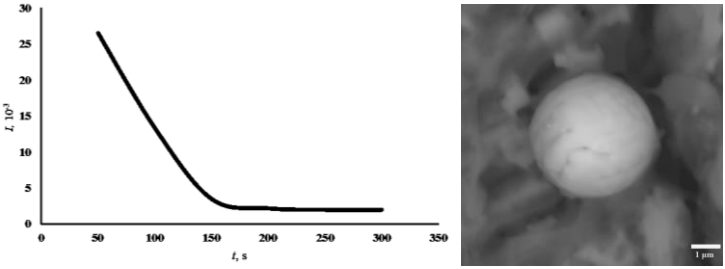


Рис. 1. Зависимость $I(t)$ БГР (слева) за период ПТ Al_2O_3 и РЭМ-изображение его поверхности (справа) после ПТ

По зависимости $I(t)$ видно, что к ~150 s I БГР быстро уменьшается, после чего выходит на стационарный уровень до окончания ПТ. Результатом его взаимодействия с поверхностью анодированного Al_2O_3 является изменение последнего с образованием фазы из сферических частиц оксида размером порядка 1–2 μm. Частицы неоднородны по структуре, что говорит об условиях их формирования: вначале исходный оксид был локально нагрет плазмой БГР до температуры плавления, а затем быстро охлажден. Из чего следует, что если в результате газоразрядного анодирования метала и формируется его оксид определенной структуры, то в последующих стадиях этого процесса она будет претерпевать преобразование. Не исключены и химические превращения оксида. Поэтому говорить об аналогии газоразрядного и электролитического анодирования металлов, в частности Al, можно лишь в рамках определенного времени их взаимодействия с анодирующим агентом при конкретных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90112.

Список литературы

1. Аверьянов Е.Е. Вопросы теории образования и формирования анодных оксидов. Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Казань: КазГУ, 2004.

2. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. Свечение металлов при их анодировании в дистиллированной воде // ПЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 10. С. 31-33.

3. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. Термовлияние на кинетику электролюминесценции алюминия и тантала при их анодировании в дистиллированной воде // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2019. Т. 16. № 2. С. 59-67.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Г. ШМАГИНА, Е.А. КОНШИНА, Д.П. ЩЕРБИНИН,
П.Д. ХАВЛЮК
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УСИЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СЕРЕБРЯНЫХ ПЛЕНОК

Исследованы спектры оптической плотности гранулированных серебряных пленок разной толщины и спектры фотолюминесценции (ФЛ) гидрофильных углеродных точек, осажденных на их поверхность из раствора. Получено двукратное плазмонное усиление интенсивности ФЛ, позволяющее использовать эти гибридные структуры как оптические материалы для фотоники.

E.G. SHMAGINA, E.A. KONSHINA, D.P. SCHERBININ,
P.D. KHAVLYUK
ITMO University, Saint-Petersburg

ENHANCEMENT OF PHOTOLUMINESCENCE OF CARBON DOTS IN HYBRID STRUCTURES BASED ON GRANULATED SILVER FILMS

The optical density spectra of granulated silver films of different thicknesses were studied and the photoluminescence (PL) spectra of hydrophilic carbon dots deposited on their surface from a solution. The twofold plasmon enhancement of the PL intensity was obtained, which allows the use of these hybrid structures as optical materials for photonics.

Углеродные точки (C-dots) обладают рядом преимуществ по сравнению с полупроводниковыми квантовыми точками, в том числе доступностью их синтеза, низкой токсичностью, высокой биосовместимостью и другими [1, 2]. Фотолюминесценция C-dots может быть усилена в результате экситон-плазмонного их взаимодействия с металлическими наноструктурами [3-5].

В данной работе были исследованы гранулированные серебряные пленки на стеклянной подложке, толщиной 2, 4 и 10 нм, полученные резистивным испарением в вакууме. Гидрофильные C-dots получались методом конденсационной полимеризации из лимонной кислоты и этилендиамина с дальнейшей карбонизацией [6]. C-dots осаждались на твердую поверхность центрифугирования их раствора. Изучалась

фотолюминесценция (ФЛ) C-dots вблизи поверхности плазмонных наночастиц серебра на длине волны возбуждения 405 нм с помощью конфокального микроскопа. Для уменьшения безызлучательного переноса энергии в гибридных структурах на поверхность серебра наносились пять слоёв однопроцентного раствора полистирола в толуоле.

Плазмонное усиление ФЛ в 2 раза было получено в гибридных структурах с 10 нм пленками Ag (рис. 1). На рис. 2 приведены спектры оптической плотности пленок Ag после отжига при 200 °C и спектр ФЛ конденсированных C-dots. Усилению ФЛ способствуют увеличение сечения поглощения и эффект Парсела. Это открывает новые возможности их применения в фотонных и других устройствах.

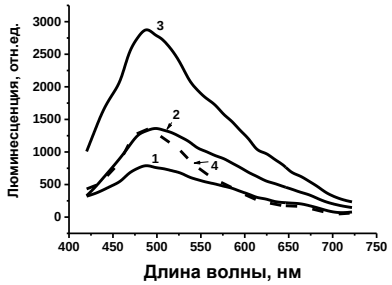


Рис. 1. Спектры ФЛ многослойных структур Ag/полистирол/C-dots с толщиной серебряных плёнок: 2 нм (1), 4 нм (2) и 10 нм (3) и контрольной структуры полистирол/C-dots (4)

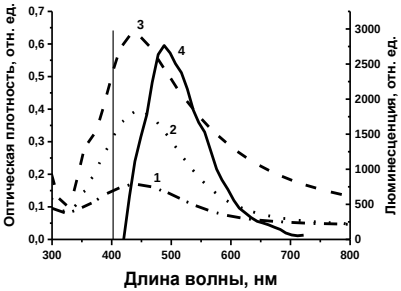


Рис. 2. Перекрытие спектров оптической плотности серебряных плёнок толщиной: 2 нм (1); 4 нм (2); 10 нм (3) и ФЛ наноструктуры C-dots, полученной за 12 циклов нанесения (4)

Список литературы

1. Zuo P., Lu X., Sun Z., Guo Y., He H. //Microchim Acta. 2016. V. 183. P. 519-542.

2. Sharma S., Umar A., Sood S., Kumar Mehta S., Kumar Kansal S. // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 748. P. 818-853.

3. Wang H., Sun X., Zhang T., Chen X., Zhu J., Xu W., Bai X., Dong B., Cui H., Song H.//J. Mater. Chem.C. 2018. V. 6. P. 147-152.

4. Gan Z., Pan P., Chen Z., Meng M., Xu H., Yu Z., Chang C., Tao Y. // Advances Science News. Small. 2018. V. 14. P. 1704239.

5. Emam A.N., Mostafa A.A., Mohamed M.B., Gadallah A.-S., El-Kemary M. // Journal of Luminescence. 2018. V. 200. P. 287-297.

6. Zhu S., Meng Q., Wang L., Zhang J., Song Y., Jin H., Zhang K., Sun H., Wang H., Yang B. // Angew. Chem. 2013. V. 125. P. 4045-4049.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н ДАВЫДОВ, О.Ф. ЗАДОРОЖНЫЙ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ВРЕМЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ С УЧЕТОМ РАЗБАЛАНСА КОНЦЕНТРАЦИЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Установлено, что модель межзонной излучательной рекомбинации в полупроводнике при биполярной инжекции носителей заряда, не учитывает физически существующий при легировании разбаланс концентраций рекомбинирующих частиц. Для вычисления числа актов рекомбинации электронно-дырочных пар с учетом различия концентраций рекомбинирующих частиц предложено использовать вычисление среднего геометрического значения концентрации с применением функций участия.

V.N. DAVYDOV, O.F. ZADOROZHNY
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

RADIATIVE RECOMBINATION RATE TAKING INTO ACCOUNT THE DIFFERENCE IN CHARGE CARRIERS CONCENTRATION

It has been established that the model of interband radiative recombination is described by the product of the total concentration of charge carriers it does not take into account the imbalance in the concentration of recombining particles physically existing during doping. To calculate the number of events of recombination of electron-hole pairs taking into account the difference in the recombining particles concentration, it is proposed to use the geometric mean value calculation of the concentration using the participation functions.

Вопрос о роли легирования в формировании люминесцентных свойств светоизлучающих полупроводниковых приборов важен как для развития теории излучения твердых тел, так и для совершенствования методологии конструирования твердотельных источников света [1-3]. Теоретические исследования проводит расчетное обоснование операции легирования полупроводника как способа уменьшения времени излучательной рекомбинации Однако каких-либо физических объяснений причин положительного влияния легирования не приводится, а обсуждаются зависимости эффективности излучения от других малозначимых параметров таких как ширины запрещенной зоны [1-3].

Классическое выражение для описания скорости излучательной рекомбинации (1), не имеет физического обоснования выбранной

математической операции, а анализ выражения показывает, что оно плохо согласования при разбалансе концентраций носителей зарядов [4].

$$R_l = B \cdot n \cdot p. \quad (1)$$

В связи с этим, предлагается использовать математическую операцию, позволяющую выбрать минимальное значение из двух величин – вычисление среднего геометрического значения. Тогда число рекомбинируемых электронно-дырочных пар может быть найдено как среднее геометрическое значений концентраций электронов *n* и дырок *p*:

$$N_{\text{рек}} = \frac{n \cdot p}{n + \cdot p}. \quad (2)$$

Выражение (2), в отличие от классического (1), показывает, что число рекомбинирующих пар, а значит и скорость излучательной рекомбинации R_l, определяется концентрацией неосновных носителей заряда – в рассматриваемом случае дырок. Однако выражение (2) при рекомбинации, вблизи значения $n \cong p$ дает ошибку до ста процентов [4]:

$$\tau_l = \tau_l^{(i)} \left[2n_i / \left(n_0 + p_0 \right) \right]. \quad (3)$$

Ее можно исключить, применив функции участия рассматриваемых процессов $f_n(n_0)$ и $f_p(n_0)$ [4, 5]. Тогда с применением функций участия выражение (2) запишется следующим образом:

$$\tau_l = \frac{\delta n}{\delta R_l} \cong \tau_l^{(i)} \frac{\left[f_n(n_0) n_0 + f_p(n_0) p_0 \right]^2}{f_n(n_0) n_0^2 + f_p(n_0) p_0^2}. \quad (4)$$

Откуда следует, что с ростом уровня легирования, время излучательной рекомбинации остается практически постоянным и равным времени рекомбинации в собственном полупроводнике. В случае среднего и высокого уровня инжекции время излучательной рекомбинации также не зависит от уровня легирования и равно времени рекомбинации в собственном полупроводнике:

$$\tau_l = \left(R_l^{(i)} / n_i \right) = \tau_l^{(i)}. \quad (5)$$

Выражение (2) с учетом функции участия, для исключении ошибки в области равных концентраций, позволило получить единую формулу для определения времени излучательной рекомбинации на любом уровне легирования.

Список литературы

1. Алферов Ж.И. // ФТП. 2000. Т. 32. № 1. С. 3-18.
2. Мартинес-Дуарт Д.М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. 2007.
3. Шуберт Ф. Светодиоды. Физматлит. 2008.
4. Давыдов В.Н., Задорожный О.Ф. ФТП. 2019. Т. 62. № 10. С. 19-25.
5. Давыдов В.Н., Харитонов С.В. и др. // ФТП. 2017. Т. 51. № 9. С. 1223-1228.

УДК 535(06)+004(06)

Э.Ж. АЛИХАЙДАРОВА[1], М.Е. КУАНЫШБЕКОВ[1],
Д.А. АФАНАСЬЕВ[1,2]
[1]*Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан*
[2]*Институт прикладной математики, Караганда, Республика Казахстан*

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУР Ag-SiO_2 НА КИНЕТИКУ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПЛЕНОК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПОЛИМЕРА ПОЛИ[3-ГЕКСИЛТИОФЕНА]

Изучено влияние наноструктур (НС) Ag-SiO_2 на оптические свойства полимера поли[3-гексилтиофен] в растворах и полимерных пленках. Обнаружено влияние НС на скорость рекомбинационных процессов в полупроводниковом полимере.

E.Zh. ALIKHAIDAROVA[1], M.E. KUANYSHBEKOV[1],
D.A. AFANASYEV[1,2]
[1]*Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan*
[2]*Institute of Applied Mathematics, Karaganda, Kazakhstan*

EFFECT OF Ag-SiO_2 NANOSTRUCTURES ON FLUORESCENCE KINETICS OF FILMS BASED ON POLY [3-HEXYLTHIOPHENE] SEMICONDUCTOR POLYMER

Effect of Ag-SiO_2 nanostructures (NS) on the optical properties of poly[3- hexylthiophene] polymer in solutions and polymer films was studied. The effect of NS on a rate of recombination processes in the semiconductor polymer was found.

В представленной работе приведены результаты исследования влияния наноструктур (НС) Ag-SiO_2 на оптические свойства полупроводниковых полимерных пленок поли[3-гексилтиофена] (P3HT). Использование НС с диэлектрической оболочкой SiO_2 позволяет исключить влияние металла на полимер связанное с переносом электрона между полимером и металлической наночастицей (НЧ).

Метод синтеза и оптические свойства НС Ag-SiO_2 приведены в работе [1]. Первоначальные измерения влияния НС Ag-SiO_2, на оптические свойства растворов полимера P3HT позволили определить концентрации НС, приводящих к значительным изменениям в интенсивности флуоресценции P3HT в хлорбензоле. Для получения пленок одинаковой толщины был использован метод центрифугирования.

Спектры поглощения и флуоресценции пленок P3HT с добавками НС $Ag\text{-}SiO_2$ приведены на рис. 1. Добавление НС не приводит к значительному изменению в спектрах поглощения полимера. При этом добавление НС изменяет интенсивность флуоресценции пленок. При концентрации НС $C = 8\cdot10^{-10}$ моль/л наблюдается рост интенсивности свечения полимера. При концентрации полимера $C = 12\cdot10^{-8}$ моль/л наблюдается уменьшение интенсивности свечения, что коррелирует с данными, полученными для растворов.

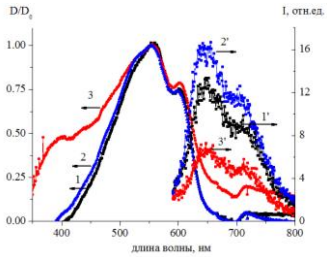


Рис. 1. Спектры поглощения (1-3) и флуоресценции (1'-3') пленок P3HT без НС и с добавкой НС $Ag\text{-}SiO_2$ при $C(Ag\text{-}SiO_2) = 8\cdot10^{-10}$ моль/л (2) и $C(Ag\text{-}SiO_2) = 12\cdot10^{-8}$ (3).

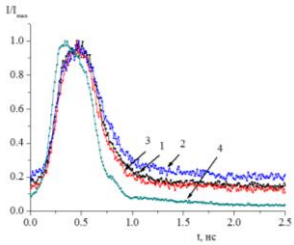


Рис. 2. Кинетика флуоресценции полимера без НС (1) и с добавкой НС $Ag\text{-}SiO_2$ при $C(Ag\text{-}SiO_2) = 8\cdot10^{-10}$ моль/л (2) и $C(Ag\text{-}SiO_2) = 12\cdot10^{-8}$ (3), 4 – профиль лазерного луча 532 нм

Кинетика флуоресценции полимера в пленках приведена на рис. 2. Кинетика свечения полимера имеет не экспоненциальный характер затухания (кривые 1-3, рис. 2) причиной такого поведения может быть присутствие рекомбинационных процессов в полимере. Аппроксимация кинетических данных показала малую достоверность при использовании формулы $I = A\cdot t^{-3/2}$. В тоже время в рамках формулы Беккереля наблюдается высокая достоверность аппроксимации [2].

Проведенные исследования показали влияние НС на фотопроцессы в полупроводниковом полимере P3HT в растворе и в твердой пленке. Определены концентрации НС при которых наблюдается рост интенсивности свечения и его падения. Обнаружено влияние НС на скорость рекомбинационных процессов в полупроводниковом полимере.

Список литературы

1. Afanasyev D., Alikhaidarova E. Ibrayev N. // Abstracts of the International symposium fundamentals of laser assisted micro-& nanotechnologies. Saint-Peterburg, 2019. P. 152.

2. Антипин В.А., и др. // Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19. № 4. С. 1156.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. БУХАРОВ, А.О. КУЧЕРИК, С.М. АРАКЕЛЯН
Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФРАКТАЛЬНОЙ ОСТРОВКОВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ

Приведены результаты расчетов интенсивности рассеяния излучения на поверхности островковой пленки благородных металлов, структура которой моделируется как фрактальный кластер.

D.N. BUKHAROV, A.O. KUCHERIK, S.M. ARAKELIAN
Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

MODELING OF THE OPTICAL PROPERTIES OF FRACTAL ISLAND METAL FILM

The results of calculations of the intensity of radiation scattering on the surface of an island film of noble metals, the structure of which is modeled as a fractal cluster, are presented.

Островковые пленки благородных металлов – Ag, Au и их соединения, имеющие фрактальный характер структуры, находят обширное применение в различных областях науки и техники, особенно в наноэлектронике и нанофотонике.

Исследуемые нанопленки были получены методом термодиффузного осаждения на стекло из коллоидного раствора наночастиц благородных металлов (Ag, Au, смести Ag/Au) с глицерином.

После осаждения сформировались кластерные пленки, с дендритной фрактальной структурой, в которой хорошо выделяются отдельные частицы размерами 30–100 нм.со средней высотой от 10 до 50 нм [1].

Полученные наноструктуры исследовались с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D и зондовой нанолаборатории Интегра-Аура (рис. 1) [2], в ходе которых было установлено, что на их оптические свойства оказывают сильное влияние структурные особенности.

Таким образом для описания оптических свойств было проведено моделирование структуры фрактально дендритной пленки в приближении модели диффузно-ограниченной агрегации, в рамках окрестности фон Неймана [3]. В расчетах варьировалась вязкость среды и вероятность

слипания, что позволило смоделировать различные типы агрегатов. Для полученных структур оценивалась фрактальная размерность.

Интенсивность рассеяния излучения оценивалась как:

$$S(k) \sim k^{-D},$$

где S – интенсивность рассеянного света, k – волновой вектор фотона ($k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны), D – фрактальная размерность кластера [4].

На рис. 3 изображен график интенсивности рассеяния излучения в зависимости от длины волны при различных фрактальных размерностях.

Представленные модели на качественном уровне достаточно верно отображают моделируемые свойства полученных островковых металлических наноплёнок.

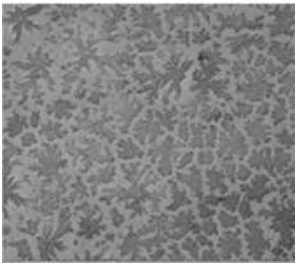


Рис. 1. АСМ изображение фрактальной пленка Au с дендритной структурой

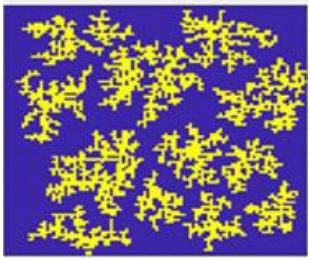


Рис. 2. Модель пленки как DLA фрактал при вязкости 1 и вероятности слипания 0.5

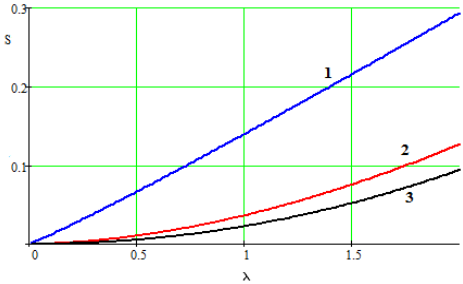


Рис. 3. Интенсивность рассеяния для DLA модели пленки от длины волны отн.ед.: $D = 1.07$ (1), $D = 1.8$ (2), $D = 2.06$ (3)

Список литературы

1. Антипов А.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116(2). С. 349-352.
2. Kucherik A.O. et. al. // Journal of Nanomaterials. 2017. V. 2017. P. 8068560.
3. Безносюк С.А. и др. // Ползуновский вестник.2005. № 4-1. С. 143-151.
4. Смирнов Б.М. // УФН. 1986. Т. 149. С. 177-219.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. КОЛЧИН, Д.В. ШУЛЕЙКО, Д.Е. ПРЕСНОВ,
С.А. КОЗЮХИН[1,2], П.И. ЛАЗАРЕНКО[3]
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[1]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва,
[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет
[3]Московский институт электронной техники, Зеленоград

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР И ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $Ge_2Sb_2Te_5$, ОТОЖЖЕННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света были исследованы тонкие аморфные пленки $Ge_2Sb_2Te_5$, обработанные фемтосекундными лазерными импульсами. Обнаружено, что в результате отжига возникают фазовые изменения, а также формируются периодические структуры на поверхности.

A.V. KOLCHIN, D.V. SHULEIKO, D.E. PRESNOV,
S.A. KOZYUKHIN[1,2], P.I. LAZARENKO[3]
Lomonosov Moscow State University
[1]Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow
[2]National Research Tomsk State University
[3]Moscow Institute of Electronic Technology, Zelenograd

FORMATION OF PERIODIC SURFACE STRUCTURES AND PHASE CHANGING IN AMORPHOUS $Ge_2Sb_2Te_5$ THIN FILMS ANNEALED BY FEMTOSECOND LASER PULSES

Thin amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films annealed by femtosecond laser pulses were studied by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. Formation of periodic surface structures and phase changing was observed in modified films as a result of obsereved such laser annealing.

Повышенный интерес к халькогенидам $Ge_2Sb_2Te_5$, наблюдаемый последнее время, связан с созданием на основе данных материалов технологии перезаписываемой и энергонезависимой памяти [1]. При этом, запись информации в структурах на основе $Ge_2Sb_2Te_5$ может быть реализована за счет воздействия импульсного фемтосекундного лазерного излучения [2]. Также необходимо отметить возможность создания

метаповерхностей на основе упомянутого халькогенида с помощью данного подхода [3].

В данной работе исходные образцы $Ge_2Sb_2Te_5$ были осаждены на титановую подложку методом магнетронного распыления. Последующий отжиг производился Cr:Forsterite лазером (1250 нм, 0.14 - 1.18 Дж/см^2, 125 фс, 10 Гц) в сканирующем режиме. Структурные свойства обработанных пленок исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фазовый состав анализировался методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) (длина волны возбуждения 488 нм).

На отожженной поверхности обнаружены одномерные структуры с периодом порядка 1.41 ± 0.03 мкм, формирование которых, вероятно всего, обусловлено интерференцией падающего лазерного излучения и индуцированными им поверхностными плазмон-поляритонами [4].

Анализ спектров КРС подтверждает аморфную структуру исходных образцов (полоса 100 - 170 см$^{-1}$ с максимумом при 156 см$^{-1}$, что соответствует Sb_2Te_3). В то же время для облученных образцов наблюдаются изменения спектров КРС, свидетельствующие об их кристаллизации, что выражается в смещении максимума полосы 100 - 170 см$^{-1}$ и появлению линий $GeTe_4$ (130 см$^{-1}$) и $SbTe_3$ (146 см$^{-1}$). Повышение плотности энергии импульсов приводит к превалированию содержания $GeTe_4$ в обработанных областях, что говорит о формировании более упорядоченной кристаллической структуры.

Таким образом, были обнаружены формирование поверхностных структур с периодом порядка 1.41 ± 0.03 мкм, а также кристаллизация аморфных тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ в результате фемтосекундного лазерного воздействия. Данный подход может позволить объединить технологии фазовой и оптической памяти.

Список литературы

1. Mocanu F.C. et. al. // J. Phys. Chem. B. 2018. V. 122 (38). P. 8998-9006.
2. Kozyukhin S. et. al. // Opt. Laser. Tech. 2019. V. 113. P. 87-94.
3. Ha Y. et. al. // Appl. Opt. 2019. V. 58 (29). P. 7996-8001.
4. Shuleiko D.V. et. al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. P. 056001.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. ДЕВИЦКИЙ[1], И.В. КАСЬЯНОВ[1,2], Д.А. НИКУЛИН[2]
[1]*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ставрополь*
[2]*Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь*

ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК AlN НА САПФИРЕ

Приведены результаты экспериментов по термическом отжиге пленок AlN на сапфире и исследовано влияние температуры и среды отжига на коэффициент пропускания тонких пленок AlN на сапфире. Установлено, что для пленок AlN, осажденных при объемной доле азота в азотно- аргоновой смеси равном 50 % отожжённых на воздухе при 800 – 900 °С наблюдается увеличение коэффициента пропускания. Отжиг пленок AlN, осажденных при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси равном 90 %, при температурах 800 – 850 °С существенно не повлиял на значение коэффициента пропускания.

O.V. DEVITSKY[1], I.V. KASYANOV[1,2], D.A. NIKULIN[2]
[1]*Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS, Stavropol*
[2]*North Caucasian Federal University, Stavropol*

INFLUENCE OF THERMAL ANNEALING ON THE OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILMS AlN ON SAPPHIRE

The results of experiments on the thermal annealing of AlN films on sapphire are presented, and the influence of the temperature and annealing medium on the transmittance of thin AlN films on sapphire is studied. It was found that for AlN films deposited at a volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture equal to 50 % annealed in air at 800 – 900 °C, an increase in the transmittance is observed. Annealing of AlN films deposited at a volume fraction of nitrogen in the nitrogen – argon mixture of 90 % at temperatures of 800 – 850 °C did not significantly affect the transmittance.

Получение пленок AlN/Al_2O_3 осуществляется в основном методами молекулярно-лучевой эпитаксией, газофазной хлоргидридной эпитаксии, атомно-слоевым осаждением. Общими недостатками этих методов являются дорогостоящее оборудование и применение высокотоксичных реагентов. Перспективными методами получения темплейтов AlN/Al_2O_3 являются импульсное лазерное напыление [1] и ионно-лучевое осаждение - простые, низкотемпературные и обеспечивающие достаточно высокое качество полученных слоев AlN на сапфире. Отжиг способствует повышению структурных и оптических свойств тонких пленок AlN/Al_2O_3.

Отжиг пленок AlN на сапфире производился на воздухе при температуре 800 - 900 °С, скорость нагрева составляла от 7.5 °С/мин, время отжига – 60 мин. Спектры пропускания в диапазоне 300 - 1100 нм были исследованы при помощи спектрометра СФ-56. В качестве образцов использовались пленки AlN, полученные ионно-лучевым осаждением при объемной доле азота в азотно- аргоновой смеси $c(N_2)$ равной 50 и 90 %.

При термическом отжиге пленок AlN, осажденных при объемной доле азота в азотно- аргоновой смеси $c(N_2)$ равном 50 % при 800 - 900 °С наблюдалось увеличение значения коэффициента пропускания в оптическом диапазоне длин волн более чем на 10 % (рис. 1). Это можно объяснить образованием на поверхности пленки оксинитрида алюминия AlN_xO_y, имеющего более высокий коэффициент пропускания, чем AlN. Отжиг пленок AlN, осажденных при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси равном 90 %, при температурах 800 - 850 °С существенно не повлиял на значение коэффициента пропускания, при температуре отжига 900 °С было отмечено снижение коэффициента пропускания, вероятнее всего обусловленное переходом пленки AlN плотного аморфного состояния в поликристаллическое (рис. 2).

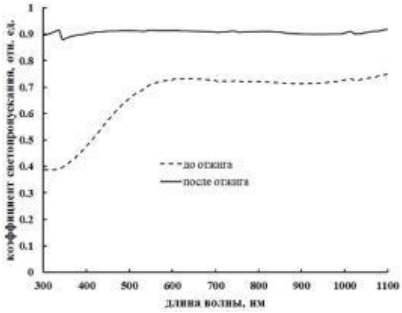


Рис. 1. Спектры пропускания образца пленки AlN на сапфире, осажденной при температуре подложки 800 °С и равном 50 % до и после термического отжига на воздухе при температуре 850 °С

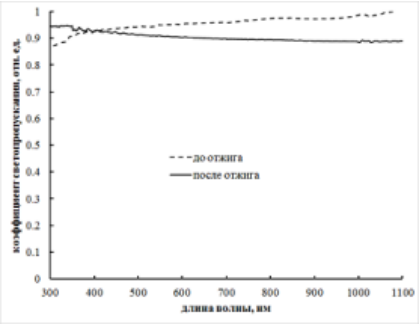


Рис. 2. Спектры пропускания образца пленки AlN на сапфире, осажденной при температуре подложки 800 °С и равном 90 % до и после термического отжига на воздухе при температуре 900 °С

Список литературы

1. Lunin L.S., Lunina M.L. et. al. // Semiconductors. 2017. V. 51. No. 3. P. 387-391.

УДК 535(06)+004(06)

О.В. ДЕВИЦКИЙ, Д.А. НИКУЛИН[1], И.А. СЫСОЕВ
Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ставрополь
[1]Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК AlN НА САПФИРЕ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Приведены результаты экспериментов по получению тонких пленок AlN на сапфире и исследованы их оптические свойства. Определены параметры ионно-лучевого осаждения пленок AlN на сапфире, при которых достигаются высокие значения коэффициента пропускания пленок AlN.

O.V. DEVITSKY, D.A. NIKULIN[1], I.A. SYSOEV
Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS, Stavropol
[1]North Caucasian Federal University, Stavropol

MORPHOLOGY AND OPTICAL PROPERTIES OF AlN THIN FILMS ON SAPPHIRE OBTAINED BY THE ION-BEAM DEPOSITION METHOD

Presents the results of experiments on the preparation of thin AlN films on sapphire are presented and their optical properties are investigated. The parameters of ion-beam deposition of AlN films on sapphire are determined at which high transmittance values of AlN films are achieved.

Объем производства оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия на сапфире увеличивается год от года. Однако на данный момент нет универсальной хорошо отработанной технологии получения наногетероструктур GaN непосредственно на сапфировых подложках, которая бы не приводила к возникновению повышенной плотности дислокаций на гетерогранице. Основным из подходов, снижающих влияние дислокаций несоответствия может быть использование буферных слоев близких по параметрам кристаллической решетки к GaN, например, AlN [1]. Метод ионно-лучевого осаждения (ИЛО) зарекомендовал себя как достаточно простой и эффективный метод для получения тонких пленок широкозонных полупроводников и соединений A^3B^5 [2]. Тонкие пленки AlN на сапфире были получены методом ионно-лучевого осаждения (ИЛО) из алюминиевой мишени чистотой 99.99 % и азотно-аргоновой смеси с чистотой используемых газов 99.999 %. Энергия ионного пучка

варьировалась от 600 до 900 эВ, ток ионного пучка составлял 50 – 60 мА, температура подложки изменялась в диапазоне 600 - 800 °С, время осаждения составляло 1 час. Объемная доля азота в азотно- аргоновой смеси $c(N_2)$ изменялась в диапазоне от 10 до 90 %. Определена прямая зависимость энергии пучка от объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси – при 900 эВ по сравнению с 600 эВ содержание азота в пленке AlN увеличивается с 10 % до 35 % (рис. 1). При величине энергии пучка в 600 эВ имеется незначительная зависимость от температуры подложки, и сохраняется только прямая зависимость от количества азота в азотно-аргоновой смеси. Установлено, что при содержании азота в пленках более 20 % коэффициент пропускания пленок значительно снижается.

Результаты исследования оптических спектров пропускания показали, что для выращивания пленок AlN методом ИЛО с высокими значениями коэффициента пропускания (92 %) необходимо уменьшать энергию ионного пучка до 600 эВ и повышать долю азота в азотно-аргоновой газовой смеси до 90 %. (рис. 2) Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности применения метода ИЛО для выращивания буферных слоев AlN на сапфире для оптоэлектронных устройств.

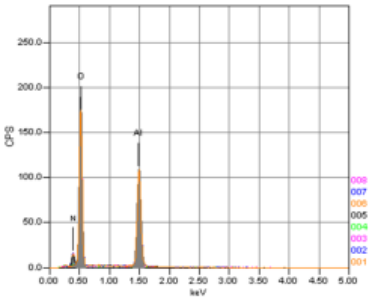


Рис. 1. Результаты рентгеновского энергодисперсионного микроанализа поверхности пленки AlN на сапфире, осажденной при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 90 %

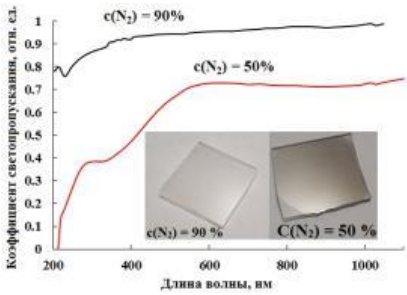


Рис. 2. Спектр пропускания образца пленки AlN на сапфире, осажденной при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 90 % и 50 %

Список литературы

1. Kueller V., Knauer A. et. al. // Journal of Crystal Growth. 2011. V. 315. P. 200-203.
2. Pashchenko A.S., Lunin L.S. et. al. // Beilst. J. Nanotechnol. 2018. N 9. P. 2794-2801.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ВАРЛАМОВ[1], М.М. СЕРГЕЕВ[1], Я.М. АНДРЕЕВА[1], Т.Е. ИТИНА[1,2]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Лионский университет, Сент-Этьен, Франция*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК TiO_2 С НЕОДНОРОДНЫМ ПО РАЗМЕРУ АНСАМБЛЕМ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Описаны общие принципы определения оптических характеристик нанокомпозитных пленок на основе TiO_2, содержащих наночастицы серебра. На основе модели Бурггемана в приближении Бергмана представлен алгоритм расчета диэлектрической проницаемости эффективной среды, учитывающий дисперсионный разброс концентрации наночастиц по их размеру, химический состав металлической фазы и диэлектрические свойства прозрачной матрицы. С использованием спектральных зависимостей диэлектрической проницаемости композита и уравнений Френеля восстанавливались коэффициенты пропускания. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными.

P.V. VARLAMOV[1], M.M. SERGEEV[1], Ya.M. ANDREEVA[1], T.E. ITINA[1,2]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*University Lyon, Saint-Etienne, France*

MODELING OF THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE TiO_2 FILMS WITH A HETEROGENEOUS SIZE OF SILVER NANOPARTICLES

The general principles for determining the optical characteristics of composite TiO_2 films containing silver nanoparticles are described. Based on the Burgheman model in the Bergman approximation, an algorithm for calculating the permittivity of an effective medium in the form of a composite with nanoparticles is presented, taking into account the dispersion of the concentration of particles by their size, the chemical composition of the metal phase and the dielectric properties of the transparent matrix. Using the spectral dependencies of the permittivity of the composite and the Fresnel equations, transmission coefficients were reconstructed. The simulation results were compared with experimental data.

Тонкие композитные материалы на основе диэлектрических и полупроводниковых прозрачных золь-гель пленок содержащих наночастицы благородных металлов, находят широкое применение для

создания фотогальванических элементов [1] и устройств хранения данных [2, 3]. На спектральные характеристики таких материалов существенное влияние оказывает эффект плазмонного резонанса, возникающий при взаимодействии подающего излучения с оптически резонансными металлическими наночастицми.

В свою очередь, оптические характеристики таких композитов зависят как от свойств материала матрицы, так и от свойств наночастиц, а именно от их размера, формы, концентрации, дисперсионного разброса по размеру и др. [4]. В последнее время для определения оптических характеристик композитных материалов широко применяется теория эффективной среды в различных приближениях. Однако, известные модели работают с определенными ограничениями и не охватывают все характеристики композитного материала.

В данной работе предложен способ моделирования оптических характеристик тонких золь-гель пленок TiO_2 со сферическими наночастицами серебра с помощью теории эффективной среды Бурггемана в решении Бергмана. При моделировании учитывается ансамбль частиц с дисперсионным разбросом по размеру. Условно, включения в диапазоне от 1 до 120 нм разделяются на три группы: нанокластеры, зародыши и наночастицы. С учетом данного предположения учитывается доля металлической фазы в композите, которая затем используется для вычисления диэлектрической проницаемости эффективной среды.

Справедливость предложенных допущений демонстрируется при сравнения спектральных коэффициентов пропускания, полученных с помощью моделирования и измеренных экспериментально. Хорошее согласование результатов моделирования с экспериментом позволяет утверждать, что на характер спектральных зависимостей влияют все три типа включений. Предложенный способ моделирования может быть использован для определения спектральных характеристик других оптически-прозрачных матриц с плазмонными наночастицами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10208).

Список литературы

1. Clavero C. // Nature Photonics. 2014. V. 8.
2. Crespo-Monteiro N. et. al. // Advanced Materials. 2010. V. 22 (29). P. 3166-3170.
3. Qiao Q. et. al. // Applied Physics Letters. 2009. V. 94 (7). P. 074104.
4. Kreibig U., Vollmer M. // Springer. 1995. V. 25.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Х. ДЖАНАБЕКОВА, Е.П. МЕНЬШОВА, Н.Х. ИБРАЕВ
Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

КОМПОЗИТ ОКСИД ГРАФЕНА – НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА ДЛЯ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Синтезирован композит на основе оксида графена с наночастицами серебра. Исследована возможность и условия применения композита в качестве активного слоя подложек для наблюдения гигантского комбинационного рассеяния света.

R.Kh. DZHANABEKOVA, E.P. MENSHOVA, N.Kh. IBRAYEV
Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

GRAPHENE OXIDE - SILVER NANOPARTICLES COMPOSITE FOR GIANT ENHANCEMENT OF RAMAN SCATTERING

A composite based on graphene oxide with silver nanoparticles was synthesized. The possibility and conditions of using the composite as an active layer of substrates for observing surface enhanced Raman scattering are studied.

Разработка сенсоров на основе благородных металлов, обладающих плазмонными свойствами, для усиления комбинационного рассеяния света является перспективной и актуальной задачей. В результате электромагнитных и химических взаимодействий между анализируемым веществом и поверхностью металла коэффициент усиления рамановского сигнала может достигать $10^6 – 10^{14}$ [1]. Оксид графена (ОГ) также может усиливать комбинационное рассеяние [2]. Кроме того он обладает хорошей адсорбционной способностью, гасит флуоресценцию и гораздо дешевле наночастиц благородных металлов [3].

Целью работы является синтез композита на основе оксида графена и наночастиц серебра и исследование возможности его использования в качестве активного слоя для получения гигантского комбинационного рассеяния. Композит синтезирован восстановлением ионов серебра из аммиачного комплекса в коллоидном растворе оксида графена. На рис. 1 показано РЭМ изображение синтезированного композита. В качестве зонда для исследования активности подложек для ГКР использованы растворы красителя Р6Ж с концентрациями 10^{-4}, 10^{-6}, 10^{-7} М. Для сравнения были измерены спектры КР красителя на чистом покровном

стекле. Измерения рамановских спектров выполнены на конфокальном микроскопе Confotec MR 520. Спектры образцов возбуждали на 532 и 632,8 нм. Максимум полосы поглощения Р6Ж лежит в районе 530 нм. При возбуждении КР спектров красителя, нанесенного на чистую стеклянную подложку, зеленым лазером преимущественно наблюдается флуоресценция. В то же время для Р6Ж, нанесенного на поверхность композита, в спектрах КР наблюдаются характеристические колебательные полосы (рис. 2). Усиление интенсивности КР сигнала в данном случае трудно оценить корректно из-за значительной флуоресцентной составляющей, которая нивелирует наличие характеристических пиков Р6Ж на покровном стекле. При возбуждении КР спектров образцов красным лазером флуоресценция красителя не создает помехи. Интенсивность сигнала КР спектра на композите возросла, в среднем, в 64 раза для полосы комбинационного сдвига 1364 см$^{-1}$ (при использовании раствора 10^{-4} М). Однако для определения низких концентраций (10^{-6}, 10^{-7} М) наиболее оптимально использовать резонансное возбуждение (532 нм) из-за мешающего влияния КР спектра оксида графена.

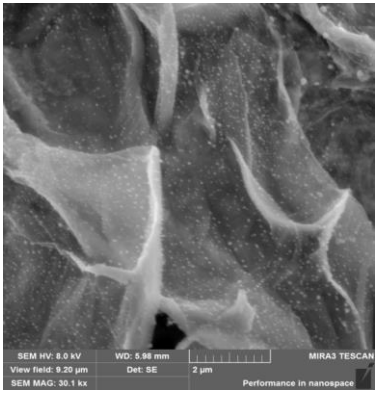


Рис. 1. РЭМ изображение композита ОГ-наночастицы Ag

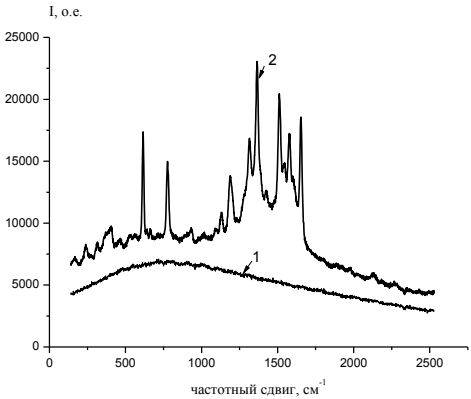


Рис. 2. КР спектры Р6Ж (конц. 10^{-6} М), $\lambda_{возб}$ = 532 нм: на покровном стекле (1); на композите (2)

Список литературы

1. Cardinal M.F. et. al. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. P. 3886-3903.
2. Jiang Y., Carboni D. et. al. // Materials. 2018. V. 11. P. 1674.
3. Xie L., Ling X. et. al // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 9890-9891.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Г. КУЗНЕЦОВ, С.Е. СВЯХОВСКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДА ГРАФЕНА

Приведены результаты экспериментов по лазерному восстановлению оксида графена. Представлены результаты численного расчета температуры плёнки оксида графена в процессе лазерной обработки.

L.G. KUZNETSOV, S.E. SVYAKHOVSKIY
Lomonosov Moscow State University

METHODS OF CARBON-BASED NANOMATERIALS CREATION BY LASER REDUCTION OF GRAPHENE OXIDE

Presents the results of experiments on the laser reduction of graphene oxide. Presents the results of a numerical calculation of the temperature of a graphene oxide film during laser treatment.

Существует ряд приложений, в которых одновременно требуется получение оксида графена с высокой тепло- и электропроводностью, что может быть обеспечено различными функциональными группами на поверхности [1, 2]. Для создания такого типа материалов оксид графена требуется термически восстановить. Целью работы является исследование влияния различных температурных режимов на восстановление оксида графена в условиях окружающей среды при помощи лазерного излучения.

Для определения влияния условий лазерного облучения варьируются следующие параметры: частота лазерных импульсов, длительность импульсов, скорость сканирования лазерного луча, средняя мощность лазера. Полученные образцы обрабатываются в ультразвуковой ванне и анализируются с помощью рамановской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Для оценки температуры пленки при облучении лазером численно решается уравнение теплопроводности в приближении радиально симметричной системы.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента МК-2761.2019.2.

Список литературы

1. Evlashin S.A., Svyakhovskiy S.E. et. al. // Adv. Mater. Interfaces. 2018. V. 5. P. 1800737.
2. Evlashin S., Dyakonov P. et. al. // Appl. Mater. Interfaces. 2016. V. 8. P. 28880-28887.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ПЕРЕВОЩИКОВ[1], А.И. КАЛУГИН, Е.А. АНТОНОВ
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
[1]АО «Ижевский Радиозавод»

СТРУКТУРА НИЖНЕЙ ЗОНЫ ПРОВОДИМОСТИ SnTe

Для кристалла SnTe приведены результаты теоретических расчетов зонной структуры и парциальных вкладов *s*-, *p*- и *d*-состояний олова и теллура в формирование нижней зоны проводимости. Выявлены существенные различия вкладов парциальных состояний в зависимости от положения в зоне Бриллюэна.

D.A. PEREVOSHCHIKOV[1], A.I. KALUGIN, E.A. ANTONOV
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk
[1]Izhevskiy Radiozavod LLC

STRUCTURE OF LOWER CONDUCTION BAND OF SnTe

The results of theoretical calculations for the band structure and the partial contributions of the *s*-, *p*-, and d-states of tin and tellurium into the lower conduction band for the SnTe crystal are presented. Significant differences of contributions of partial conditions in dependence form the position in the Brillouin zone are revealed.

Теллурид олова в последнее время получил широкое распространение при изготовлении датчиков инфракрасного излучения [1] и термоэлектрических элементов [2], выступая как экологически безопасная замена PbTe. SnTe относится к прямозонным полупроводникам с минимальной шириной запрещенной зоны в ~0.2 эВ, расположенной в точке L [3]. Оптические свойства материалов существенно зависят от дисперсии зон и ограничений, накладываемых правилами отбора. Последнее напрямую зависит от того, состояния с какой симметрией формируют данный энергетический уровень. Для кристаллов PbB^6 (B^6 = S, Se, Te) известно [4], что формирование их нижних зон проводимости (НЗП) происходит в основном за счет *p*-состояний катиона. При этом в [5] для SnTe показано, что распределение парциальных плотностей состояний для НЗП имеет особенность в точке L: основной вклад приходится не на *p*-состояния Sn, а на *s*-состояния Sn (49 %) и *p*-состояния Te (48 %).

В данной работе теоретически изучено распределение парциальных вкладов *s*-, *p*- и *d*-состояний Sn и Te при формировании НЗП SnTe вдоль некоторых направлений в зоне Бриллюэна (ЗБ). Расчеты основаны на теории функционала электронной плотности, реализованной в программе

exciting [6]. Расчеты зон приведены на рис. 1. Наши результаты хорошо согласуются с ранее известными расчетами [5]. Кроме абсолютного минимума в точке L НЗП содержит локальные минимумы в точке X и вдоль осей Δ и Σ. Далее рассчитаны парциальные вклады олова и теллура при формировании НЗП (рис. 2). Наши результаты подтверждают выводы о том, что в точке L НЗП формируется в основном не *p*-состояниями олова, а *p*-состояниями теллура (56 %) и *s*-состояниями олова (39 %). При удалении от точки L практически во всех точках содержание *p*-состояний олова становится равным 60 – 80 %, *p*-состояний теллура – 20 %, а вклад *s*-состояний олова спадает практически до нуля. Нарушение данного правила (кроме окрестности точки L) происходит лишь в окрестности одного из минимумов НЗП в точке X. В данной области ЗБ преобладающими становятся вклады *d*-состояний обеих компонент.

Полученные результаты свидетельствуют о сложной природе НЗП SnTe. Это может свидетельствовать о существенной зависимости интенсивности оптических переходов в НЗП от локализации в ЗБ.

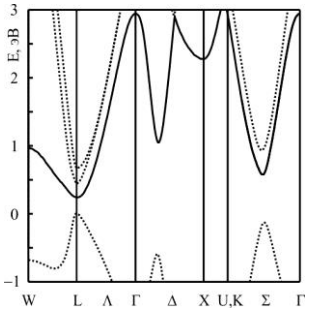


Рис. 1. Зонная структура SnTe (сплошной кривой выделена нижняя зона проводимости)

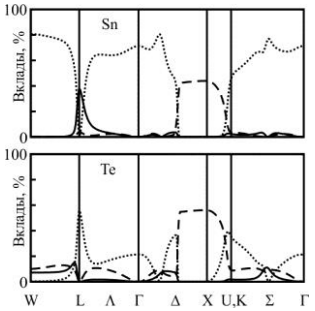


Рис. 2. Парциальные вклады *s*-, *p*- и *d*-состояний при формировании НЗП SnTe

Список литературы

1. Zhang H. et. al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. P. 14067.
2. Moshwan R. et. al. // Nano Energy. 2019. V. 65. P. 104056.
3. Соболев В.В. Собственные энергетические уровни соединений группы A^4B^6. Штиинца, Кишинев. 1981.
4. Hummer K. et. al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 195211.
5. Ye Z.-Y. et. al. // NPJ Computational Materials. 2015. V. 1. P. 15001
6. Gulans A. et. al. // J. Phys.Condens. Matter. 2014. V. 26. P. 363202.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Х. ИБРАЕВ[1], Д.А. АФАНАСЬЕВ[1,2]
[1]*Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан*
[2]*Институт прикладной математики, Караганда, Республика Казахстан*

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПЕРОВСКИТ–ОКСИДНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК

Приведены результаты изучения процесса переноса заряда в тонких пленках перовскит–оксидных полупроводник (ZnO, TiO_2). Определен материал и структура оксидных пленок приводящих к эффективному переносу заряда.

N.Kh. IBRAYEV[1], D.A. AFANASYEV[1,2]
[1]*Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan*
[2]*Institute of Applied Mathematics, Karaganda, Kazakhstan*

INVESTIGATION OF INTERFACIAL CHARGE CARRIERS SEPARATION PROCESS AT PEROVSKITE – OXIDE SEMICONDUCTOR

The result of studying the charge transfer process in thin films of perovskite – oxide semiconductor was presented (ZnO, TiO_2). Were determined material and structure of oxide films for efficient charge transfer in the samples.

Процесс разделения зарядов на границе раздела перовскит–оксидный полупроводник исследовался на основе двух серий образцов. Первая серия образцов была получена на основе компактных и наноструктурированных пленок ZnO [1-3]. Вторая – на основе компактных и наноструктурированных пленок TiO_2 [4-6]. Метод синтеза перовскитных пленок и методика измерения кинетики их люминесценции приведены в работе [7] Информация о времени жизни люминесценции перовскитов на поверхности ZnO и TiO_2 показана в табл. 1. В случае образца $CH_3NH_3PbI_3$ (MaiPbI) на FTO кинетика люминесценции затухает экспоненциально с временем жизни 22,3 нс. В случае пленки MaiPbI на поверхности пленок ZnO и TiO_2 происходит уменьшение времени жизни люминесценции. Как известно [8], эффективность переноса заряда можно оценить по тушению интенсивности или времени жизни люминесценции. В случае пленок ZnO, анализ данных показывает, что лучший перенос заряда наблюдается для компактной пленки, полученной методом

импульсного электрохимического синтеза. С другой стороны, использование данного метода для синтеза наностержней ZnO не привело к эффективному переносу электрона с перовскита на пленку ZnO.

Таблица 1. Время жизни люминесценции перовскитных пленок

Образец (вид пленки, метод синтеза, ссылка на источник литературы с описанием метода синтеза оксидной пленки)	Время жизни τ (нс)	τ, (нс) (после нанесения пленки Spiro-OMeTAD)
FTO–MaiPbI	22,3	6,99
ZnO (компактная пленка, золь-гель метод [1]) – MaiPbI	17,56	14,39
ZnO (комп. пленка, электрохим. метод [2]) – MaiPbI	15,68	13,30
ZnO (наностержни, гидротерм. метод [3]) – MaiPbI	17,21	10,17
ZnO (наностержни, электрохим. Метод [3]) – MaiPbI	22,3	6,45
TiO_2(комп. пленка [4])–MaiPbI	23,2	21,33
TiO_2(наностержни [5])–MaiPbI	7,19	6,50
TiO_2(пористая пленка [6])–MaiPbI	6,07	3,69

В случае пленок TiO_2 наилучший перенос заряда с перовскита наблюдается для пористой пленки TiO_2. Для компактной пленки TiO_2 как до нанесения, так и после нанесения Spiro-OMeTAD наблюдается большое время жизни люминесценции, что говорит о слабом развитии процесса переноса заряда в данном образце.

Таким образом, наблюдается перенос электрона с перовскита в оксидный полупроводник (TiO_2, ZnO) и перенос дырки с перовскита в слой p-типом проводимости (Spiro-OMeTAD). По результатам работы оценены скорости переноса заряда с перовскитных пленок в пленки с n- и p-типом проводимости, в соответствии с методом, приведенным в работе [8].

Список литературы

1. Ilyassov B.R., Ibrayev N.Kh. // IOP Conf. Ser.: Mat. Sc. and Eng. 2016. V. 110. P. 012067.
2. Ибраев Н.Х., Ильясов Б.Р. // Журнал ПЭОС. 2016. Т. 1. Вып. 18. С. 102.
3. Afanasyev D.A. et. al. // Bulletin of the Univ. of Karaganda-phys. 2017. N. 1(85). P. 22.
4. Alturisa M.I. et. al. //IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 877. P. 012046.
5. Сериков Т.М. и др. // Известия Академии наук. Сер. хим. 2017. № 4. С. 1-8
6. Ibrayev N.Kh. // Eurasian Phys. Tech. Jour. 2016. V. 13. N. 1(25). P. 45.
7. Afanasyev D.A. et. al. // IOP Conf. Ser.: Mat. Sc. and Engin. 2018. V. 289. P. 012001.
8. Pydzin´ska K. et. al. // ChemSusChem. 2016. V. 9. P. 1.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н. ДАВЫДОВ, О.Ф. ЗАДОРОЖНЫЙ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОГРАНИЧЕНИЕ ЧИСЛА УРОВНЕЙ РАЗМЕРНОГО КВАНТОВАНИЯ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Рассматривается выполнение критерия размерного квантования в квантовых ямах прямоугольного профиля для энергетических состояний различного значения энергии. Установлено, что существует предельный номер дискретного состояния свободного носителя заряда, выше которого критерий размерного квантования не выполняется. Показано, что число уровней размерного квантования не может превышать трёх. Полученный результат применим как квантовым ямам, так и квантовым проволокам, квантовым точкам.

V.N. DAVYDOV, O.F. ZADOROZHNY
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

A NUMBER RESTRICTION OF DIMENSIONAL QUANTIZATION LEVELS IN ELEMENTS OF NANOELECTRONICS

Realization of a criterion of dimensional quantization in quantum wells with rectangular profiles is considered. It is established that there is the limit number of the discrete state of a free charge carrier in the well, above which the criterion of dimensional quantization is not fulfilled. It is shown that in quantum wells with rectangular profiles, the number of levels of dimensional quantization cannot exceed two or three. The result obtained is applicable to quantum wells, quantum wires, and quantum dots.

Известно, что при размере потенциальной ямы меньше длины волны де Бройля из-за «тесноты» в яме электрон не может проявить свои корпускулярное свойства, поскольку теряет возможность свободно перемещаться в кристалле, участвуя как в броуновском движении, так и дрейфовом, если приложены внешние поля. В стесненных условиях электрон проявляет себя как пакет волн, у каждой из которых длина волн укладывается целое число раз по геометрическому размеру потенциальной ямы (по направлению размерного квантования) [1-3]. Целью данной работы является рассмотрение ограничения на число уровней размерного квантования, вызванное нарушением условия размерного квантования при высоких уровнях энергии носителей заряда в областях квантования. Выражение для критической длины квантовой яме прямоугольной формы,

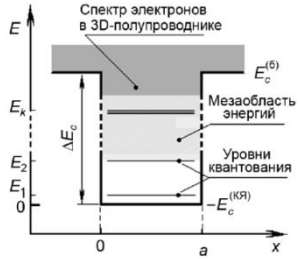


Рис. 1. Зонная диаграмма прямоугольной КЯ с ограничением числа уровней энергии

при размерах меньше которой поведение электрона в ней определяется его не корпускулярной, а волновой природой, называется длиной волны де Бройля и описывается выражением:

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m_e^* E}}, \qquad (1)$$

Для наблюдения размерного квантования при энергии E_n необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$a \le \frac{h}{\sqrt{2m_e^* E_n}}. \qquad (2)$$

Тогда энергетический спектр преобразуется из непрерывного в набор дискретных уровней [3]:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^* a^2} n^2. \qquad (3)$$

Подставляя в (2) выражение (3), получим:

$$a \le \frac{h}{\sqrt{2m_e^* \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^* a^2} n^2}} = \frac{2a}{n}. \qquad (4)$$

Отсюда следует, что $n \le 2$. Этот результат означает, что эффект размерного квантования приводит к появлению только двух дискретных уровней энергии: E_1 и E_2. При более высоких энергиях спектр электрона в КЯ имеет структуру зоны проводимости 3D полупроводника. Таким образом, структура зонного спектра в КЯ будет представлять собой три области: область размерного квантования, мезаобласть, квазинепрерывный спектр 3D полупроводника (рис. 1).

Из проведенного рассмотрения следует, что для получения узкого спектра излучения наноэлемента и высокой мощности излучения глубина n-КЯ и p-КЯ не должна значительно превышать энергии вторых уровней размерного квантования в мини зонах.

Список литературы

1. Алферов Ж.И. // ФТП. 2000. Т. 32. № 1. С. 3-18.
2. Мартинес-Дуарт Д.М. Мир материалов и технологий // Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. 2007.
3. Шуберт Ф. Светодиоды. Физматлит. 2008.

УДК 535(06)+004(06)

Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ, А.О. РЫБАЛТОВСКИЙ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

СИНТЕЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ Au/Ag МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Демонстрируется одностадийный метод создания биметаллических наночастиц (НЧ), состоящих из серебра (Ag) и золота (Au), в среде сверхкритического CO_2 (скCO_2), а также установка для его реализации. Обсуждаются преимущества скCO_2 как безвредного растворителя для формирования устойчивых коллоидных растворов. Анализируются возможности данного подхода для создания НЧ с другим элементным составом.

E.O. EPIFANOV, N.V. MINAEV, A.O. RYBALTOVSKIY
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

SYNTHESIS OF BIMETALLIC Au/Ag NANOPARTICLES BY METHOD OF LASER ABLATION IN SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

A one-step method for creating bimetallic nanoparticles (NPs) consisting of silver (Ag) and gold (Au) in a supercritical CO_2 media (scCO_2), and an experimental setup for its realisation are demonstrated. The advantages of using scCO2 as a harmless solvent for the formation of stable colloidal solutions are discussed. The possibilities of this approach for creating NPs with a different elemental composition are analyzed.

Использование сверхкритических флюидных (СКФ) технологий совместно с технологией лазерной абляции мишени в среде скCO_2 позволило достаточно легко получить наночастицы (НЧ) из различных материалов. Одним из перспективных новых методов является создание биметаллических НЧ в среде скCO_2. Такие НЧ могут предствлять интерес для определенных отраслей медицицны [1].

В работе использовался лазер Lotis TII LS-2138TF. Для формирования в объеме реактора среды скCO2 использовалась система терморегулирования реактора и насос высокого давления. Схема установки представлена на рис. 1.

Эксперименты проводились при плотности ск среды 0,85 г/см^3. Фокусировка лазерного пучка осуществлялась линзой в подвижной оправке.

Мишенью служила составная мишень: половина из серебра, половина из золота. Для исследования поглощающих свойств получаемого коллоидного раствора НЧ использовалась следующая схема: излучение дейтериевой лампы заводилось внутрь объема реактора и регистрировалось на выходе спектрометром Ocean optics QEPro (рис. 2).

Полученные «смывы» частиц в растворе этилового спирта были проанализированы на просвечивающем электронном микроскопе.

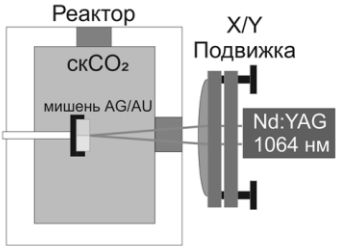


Рис. 1. Схема установки

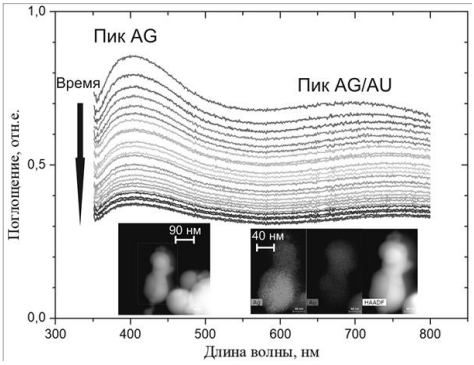


Рис. 2. Спектры поглощения после процесса абляции

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ 18-29-06056 в части сверхкритических флюидных технологий.

Список литературы

1. Цыпина С.И., Епифанов Е.О., Шубный А.Г. и др. // Сверхкритические флюиды и практика. 2019. Т. 14. № 1. С. 98.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. ГЕРАСИМОВ[1,2], Р.Г. БИКБАЕВ[2,3], А.Е. ЕРШОВ[1,2]
[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*
[3]*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

ГИБРИДИЗАЦИЯ АНОМАЛИЙ РЭЛЕЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ МОДАМИ РАЗЛИЧНЫХ ПОРЯДКОВ В РЕШЕТКАХ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ

В работе исследуются моды, возникающие в периодических решетках из алюминиевых наночастиц и их гибридизация с аномалиями Рэлея.

V.S. GERASIMOV[1,2], R.G. BIKBAEV[2,3], A.E. ERSHOV[1,2]
[1]*Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*
[3]*Kirensky Institute of Physics of Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk*

HYBRIDIZATION OF RAYLEIGH ANOMALIES WITH LOCAL MODES OF DIFFERENT ORDERS IN LATTICES OF ALUMINUM NANOPARTICLES

In this work, we study the modes formed in periodic lattices of aluminum nanoparticles and their hybridization with Rayleigh anomalies.

В одиночных изолированных наночастицах под действием внешнего оптического излучения могут возбуждаться моды электромагнитного поля различных порядков. Например, для сферических частиц модами первого порядка являются электро- и магнитодипольные моды. Возбуждение мод более высоких порядков (например, электрических и магнитных квадрупольных и октупольных) достигается как за счет изменения геометрических размеров частиц, так и управления формой волнового фронта, падающего на неё. В случае расположения частиц в упорядоченной структуре взаимодействие локальных мод каждой отдельной частицы с коллективными модами всей структуры могут приводить к проявлению коллективного резонанса, впервые описанного Рэлеем [1] и Вудом [2] более 100 лет назад и лишь совсем недавно обнаруженные экспериментально в периодических решетках, состоящих из плазмонных наночастиц [3, 4].

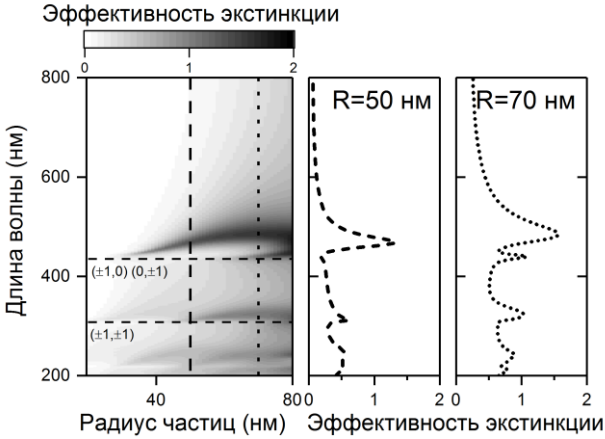


Рис. 1. Спектры экстинкции решетки сферических Al наночастиц с периодом 290 нм для различных радиусов частиц, белыми пунктирными линиями обозначено положение аномалий Рэлея соответствующего порядка, на рисунках справа показаны спектры для соответствующих значений радиуса частиц (цветные пунктирные линии)

На рис. 1 показана зависимость спектра экстинкции периодического массива алюминиевых наносфер с квадратной элементарной ячейкой и шагом 290 нм для разного значения радиуса частиц (от 20 до 80 нм). Из рисунка видно, что при размерах частиц более 30 нм в спектре формируется узкий пик экстинкции, с ростом размера частиц этот пик смещается в длинноволновую область. При этом вблизи аномалии Рэлея формируется второй пик. При этом первый пик соответствует возбуждению электрических дипольных мод, а второй пик соответствует суперпозиции электрического квадрупольной и магнитной дипольной мод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (соглашение 075-15-2019-676).

Список литературы

1. Rayleigh L. // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1907. V. 79. P. 399-416.

2. Wood R.W. // Proceedings of the Physical Society of London. 1902. V. 8. P. 269-275.

3. Markel V.A. // Journal of Modern Optics. 1993. V. 40. P. 2281-2291.

4. Markel V.A. // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2005. V. 7. P. 115-121.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АЛИЕВ, А.Р. РАВИН, К.Д. ПАХЛАВОНОВА,
Т.К. ЧЕХЛОВА, Г.В. ВОЛКОВ[1]
Российский университет дружбы народов, Москва
[1]Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЁХСЛОЙНОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрено несколько алгоритмов расчёта параметров волноведущей плёнки оптического волновода, использование которых позволяет уменьшить время на обработку экспериментальных данных. Были написаны программы для операционных систем Windows и Android, протестированные на образцах волноводов с волноведущим слоем из золь-гель пленок диоксида циркония и диоксида титана. Разработан интерфейс, позволяющий обрабатывать большое количество точек, с примерной скоростью обработки – 50 значений в минуту.

S.A. ALIEV, A.R. RAVIN, K.D. PACHLAVONOVA,
T.K. CHEKHLOVA[1], G.V. VOLKOV[1]
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
[1]Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE STUDY OF A THREE-LAYER THIN-FILM STRUCTURE

In this article were considered several algorithms for calculating the parameters of the waveguide film of an optical waveguide, the use of which reduces the time for processing experimental data. Programs were written for the Windows and Android operating systems, tested on waveguide samples with a waveguide layer of sol-gel films ofzirconium dioxide and titanium dioxide. An interface has been developed that allows you to process a large number of points, with an approximate processing speed of 50 values per minute.

В последние годы для создания оптических волноводов с успехом используются пленки диоксида титана, сформированные методом золь-гель и его аналогов [1], Пленки, изготовленные по этой технологии, обладают рядом специфических свойств, важнейшими из которых являются – возможность варьирования показателя преломления пленок путем изменения параметров технологического режима, большой

отрицательный термооптический коэффициент (ТОК), что обусловливает перспективность их применения в устройствах интегральной оптики ВОЛС. Показатель преломления и толщину пленок возможно определить измерением коэффициентов замедления волноводных мод. В основе такого метода лежит волноводное распространении света по пленке, показатель преломления которой больше показателя преломления подложки [2]. Один из примеров зависимостей толщины от коэффициента преломления волноведущегослоя, построенных при известных коэффициентах фазового замедления TE иTM мод представлен на рис. 1.

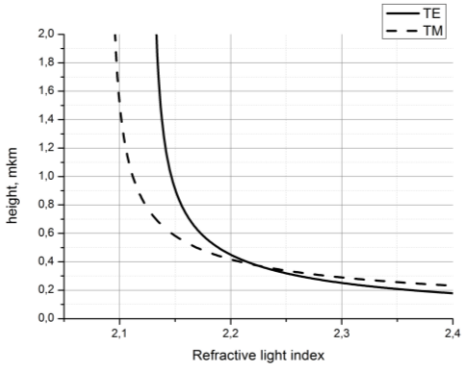


Рис. 1. Математическая модель зависимостей $h(\gamma_{TE}, \gamma_{TM})$, где точка пересечения содержит решение дисперсионных уравнений

Точка пересечения функций содержит в себе решение дисперсионных уравнений в виде толщины (ось оУ) и показателя преломленияволновода (ось оХ). Для её нахождения были рассмотрены метод простых итераций, метод хорд и касательных (комбинированный метод) и метод половинного деления (дихотомии). Для каждого метода написан алгоритм обработки на языках программирования, Python, C++ и Java.

Разработанное программное обеспечение позволяет уменьшить время на обработку экспериментальных данных, в особенности, если требуется серия промежуточных измерений нескольких образцов в лабораторных условиях. В будущем планируется добавить расчет температурной зависимости [3].

Список литературы

1. Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. // Автометрия. 2013. Т. 49. № 3. С. 121-128.
2. Derugin L.N. Integral optics. M.: Mechanical engineering, 1978.
3. Nikolaev N.E., Pavlov S.V., Chekhlova T.K. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. V. 63. № 11. P. 1265-1268.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[1], С.Н. НЕСМЕЛОВ[1], С.М. ДЗЯДУХ[1], С.А. ДВОРЕЦКИЙ[1,2], Н.Н. МИХАЙЛОВ[2], Г.Ю. СИДОРОВ[2]
[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
[2]*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

СИГНАЛЬНЫЕ И ТЕМНОВЫЕ СВОЙСТВА ИНФРАКРАСНЫХ БАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ РТУТИ

Приведены результаты экспериментальных исследований сигнальных и темновых характеристик средневолновых инфракрасных nBn-детекторов на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Выявлены механизмы ограничения темнового тока в nBn-структурах при различных параметрах широкозонных барьерных слоев. Для лучших образцов выполнены оценки значений чувствительности и обнаружительной способности.

A.V. VOITSEKHOVSKII[1], S.N. NESMELOV[1], S.M. DZYADUKH[1], S.A. DVORETSKY[1,2], N.N. MIKHAILOV[2], G.Yu. SIDOROV[2]
[1]*National Research Tomsk State University*
[2]*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk*

SIGNAL AND DARK PROPERTIES OF INFRARED BARRIER DETECTORS BASED ON MERCURY CADMIUM TELLURIDE

The results of experimental studies of the signal and dark characteristics of mid-wave infrared nBn detectors based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy are presented. The dark current limiting mechanisms in nBn structures are revealed for various parameters of wide-gap barrier layers. For the best samples, estimates of responsivity and detectivity were performed.

Использование униполярных барьерных детекторов (например, в nBn-конфигурации [1]) обеспечивает подавление темновых токов, связанных с поверхностной утечкой, а также генерацией в обедненных областях по механизму Шокли-Рида-Холла. Преимуществом технологии nBn-детекторов на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), является возможность исключения дефектообразующей процедуры ионной имплантации, которая широко применяется для формирования p-n переходов при создании гибридных матриц фотодиодов. Известно значительное число теоретических работ, посвященных изучению nBn-детекторов на основе МЛЭ HgCdTe [2, 3], но

попыток практической реализации таких детекторов пока предпринималось очень мало [4, 5].

В докладе представлены результаты исследования сигнальных и шумовых свойств первых приборных nBn-структур на основе HgCdTe, выращенных в ИФП СО РАН методом МЛЭ на подложках из GaAs(013). Пассивация боковых стенок меза-структур проводилась конформными пленками Al_2O_3, сформированными при помощи плазменного атомно-слоевого осаждения при температуре 120 ^{o}C. Создавались мезаструктуры с различными диаметрами (от 20 до 500 мкм).

Проводились исследования вольт-амперных характеристик в темновом режиме и при освещении инфракрасным излучением при изменении длины волны от 0.91 до 3.6 мкм. Установлено, что при составе барьерного слоя в диапазоне от 0.67 до 0.75 темновой ток ограничен поверхностной утечкой [6]. При составе в барьерном слое, равном 0.84, для значительной части образцов наблюдается диффузионное ограничение темнового тока, причем значения плотности темнового тока в диапазоне температур от 180 до 300 К хорошо соответствуют [7] эмпирической модели «Rule07». Показано, что исследованные nBn-структуры по значениям темновых токов превосходят ранее известные аналоги на основе МЛЭ HgCdTe.

При освещении структур инфракрасным освещением значительно возрастают токи при обратных смещениях, что связано с протеканием через барьер потока дырок, созданных за счет фотогенерации. Установлено, что величина фототока слабо зависит от температуры и состава в барьерном слое (при обратных смещениях, превышающих напряжение включения). Проведены оценки значений токовой чувствительности и обнаружительной способности для образцов с диффузионным ограничением темнового тока. Показано, что чувствительность на длине волны 2.2 мкм при температуре 220 К и напряжении -1 В достигает 0.15 А/Вт.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-12-00135

Список литературы

1. Maimon S., Wicks G.W. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151109.
2. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A. et. al. // IEEE Trans. Electron. Dev. 2018. V. 65. P. 4340.
3. Uzgur F., Kocaman S. // Infrared Phys. Technol. 2019. V. 97. P. 123.
4. Istuno A.M., Phillips J.D. et. al. // J. Electron. Matter. 2012. V. 41. P. 2886.
5. Gravrand O., Boulard F. et. al. // J. Electron. Matter.. 2015. V. 44. P. 3069.
6. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N. et. al. // Infrared Phys. Technol. 2019. V. 102. P. 103035.
7. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N. et. al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53. P. 055107.

УДК 535(06)+004(06)

У.А. ЕФИМОВА, А.И. КАЛУГИН, Е.А. АНТОНОВ
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КРАСКОЙ ПФ-115, НАНЕСЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА

Приведены результаты экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с краской ПФ-115, нанесенной на поверхность металла. Для проведения экспериментов был использован CO_2 лазер Trotec Speedy 100R. В качестве объекта исследования выбраны металлические пластины (из стали, алюминия и меди), покрытые краской ПФ-115. Установлены особенности воздействия лазерного излучения на краску в зависимости от подложки.

U.A. EFIMOVA, A.I. KALUGIN, E.A. ANTONOV
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk

RESEARCH OF THE INTERACTION OF A LASER BEAM WITH PAINT PF-115 APPLIED ON THE METAL SURFACE

The results of experiments on the interaction of laser radiation with PF-115 paint that coats metal surface are presented. The Trotec Speedy 100R CO_2 laser was used in experiments. Metal plates (steel, aluminum and copper) coated with PF-115 paint were selected as object of study. The features of the effect of laser radiation on the paint depending on the substrate are established.

Существуют разные методы очистки краски от простых: механических, химических, до требующих специального оборудования – лазера. Лазерная очистка является эффективным методом удаления краски с поверхности металла. Основными достоинствами лазерной очистки являются: локальность обработки, производительность, эффект «безызносности». Производительность лазерной обработки обеспечивается ее высокой скоростью до 200 см^2/мин, что позволяет говорить о лазерном пучке как о высокопроизводительном обрабатывающем инструменте [1]. Однако проблема взаимодействия лазерного излучения с красками рассмотрена очень слабо.

Целью работы является исследование взаимодействия лазерного излучения с краской ПФ-115 нанесенной на различные металлические поверхности. Для проведения экспериментов был использован CO_2 лазер Trotec Speedy 100R. В качестве объекта исследования выбраны

металлические пластины (из стали, алюминия и меди), покрытые краской ПФ-115.

На рис. 1 приведены графики зависимости степени очистки *n* металлической поверхности от мощности излучения *P* при трёх значениях скоростей *V* перемещения лазерного пучка. При скорости перемещения лазерного излучения 0.5 см/с (см. рис. 1а) степень очистки меди растет с увеличением мощности. Для стали и алюминия наблюдается обратная зависимость. При скорости перемещении пучка 1 см/с (см. рис. 1б) видим увеличение степени очистки для меди и алюминия. Для стали степень очистки понижается при увеличении мощности. На рис. 1в наблюдается рост степени очистки для медной пластины с увеличением мощности, а для стали и алюминия спад.

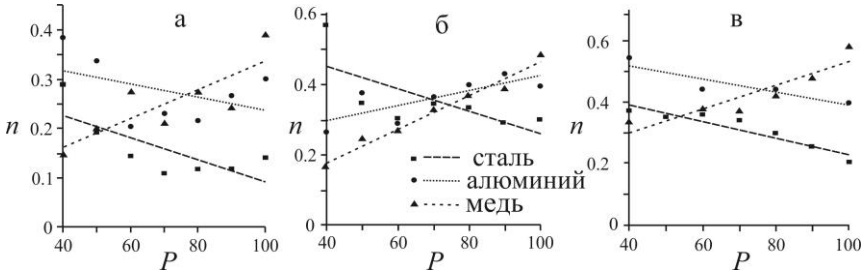


Рис. 1. Степень очистки поверхности стали, алюминия, меди для *V* = 0.5 (а), 1 (б), 1.5 см/с (в)

Результаты исследования показали, что степень очистки материала от краски обусловлена тремя процессами: термохимическое разрушение краски с образованием зольного остатка, удаление зольного остатка с поверхности металла и спекание и приваривание зольного остатка к металлу. При этом существует интервал оптимальных энергий лазерного пучка, при которых удаление краски происходит наиболее полно и без спекания остатка.

Список литературы

1. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. СПб: НИУ ИТМО, 2013.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. БОЙЧЕНКО, Д.В. ШАЙТАНОВ, О.В. КЛЕВЦОВ,
Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ПРИ ЕГО ОБРАБОТКЕ В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

На примере алюминия показана возможность формирования на его поверхности отдельных агломератов металла нанопористой структуры под действием низкотемпературной плазмы барьерного газового разряда (БГР). При этом выявлен нелинейный характер свечения БГР за время протекания данного процесса.

A.P. BOYCHENKO, D.V. SHAYTANOV, O.V. KLEVTSOV,
N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

FORMATION NANOPOROUS STRUCTURE OF METAL AT ITS PROCESSING IN BARRIER DISCHARGE

Using aluminum as an example, the possibility of the formation of individual metal agglomerates of a nanoporous structure on the surface under the influence of a low-temperature plasma of a barrier gas-discharge (BGD) is shown. At the same time, the nonlinear nature of the glow of the BGD during the course of this process was revealed.

Низкотемпературная плазма (НП) барьерного газового разряда (БГР) интенсивно исследуется в последнее время в связи с ее различными приложениями, начиная от нанотехнологий [1] и заканчивая очисткой газовых и жидких сред [2, 3]. Настоящая работа посвящена исследованию преобразования в нанометровом масштабе поверхности металлического электрода на примере алюминия (Al) при горении на нем БГР, возбуждаемом в воздухе атмосферного давления экспоненциально затухающими радиоимпульсами напряжения ~ 22.5 kV, частотами их заполнения и следования 200 kHz и 1 kHz соответственно. Газоразрядная камера представляла собой стеклянный цилиндрический конденсатор, в центре которого располагалась Al-проволока чистотой металла 99.999 %, диаметром 0.5 mm и длиной обрабатываемой поверхности 10 mm. За время газоразрядной экспозиции $t = 1700$ s регистрировалась интенсивность I (в условных единицах) излучения БГР на длине волны 337.1 nm, принадлежащей ко второй положительной системе

молекулярного азота. Визуализация структуры поверхности Al осуществлялась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) с увеличением изображений до 30000 раз. На рис. 1 представлены результаты исследований.

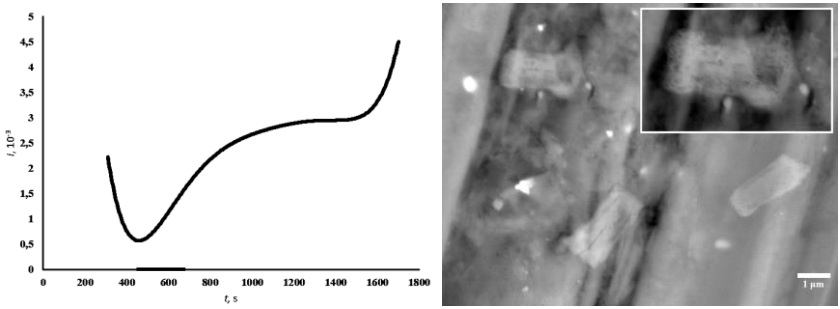


Рис. 1. Зависимость $I(t)$ БГР (слева) в процессе взаимодействия с Al-электродом и его результат на РЭМ-изображении (справа)

Как видно по зависимости $I(t)$, она носит нелинейный характер с минимумом на 480 s, после которого вновь быстро возрастает, превышая исходную величину I к концу процесса в 2 раза. В результате на поверхности металла были обнаружены его агломераты прямоугольной формы длиной до 1.5 μm с губчато-пористой структурой (см. увеличенную вкладку на рис. 1). Диаметр пор в ней не превышал 100 nm. Наличие пор таких размеров объясняет быстрое возрастание I БГР за счет локального усиления электрического поля, превышающее его среднее значение. Таким образом, из представленных предварительных данных следует, что НП БГР в процессе ее взаимодействия с металлом, в частности с Al, способна при определенных условиях и режимах возбуждения формировать на его поверхности агломераты нанопористой структуры, влияющие на характер газоразрядных процессов.

Список литературы

1. Mariotti D., Bose A.C., Ostrikov K. Atmospheric-microplasma-assisted nanofabrication: metal and metal-oxide nanostructures and nanoarchitectures // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 6. P. 1027-1033.

2. Neretti G., Taglioli M., Colonna G., Borghi C.A. Characterization of a dielectric barrier discharge in contact with liquid and producing a plasma activated water // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 015013.

3. Foster J., Sommers B., Weatherford B., Yee B., Gupta M. Characterization of the evolution of underwater DBD plasma jet // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. V. 20. P. 034018.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. МАКИН[1,2], В.В. ТРУБАЕВ[3], Р.С. МАКИН[4]
[1]*Институт ядерной энергетики СПбПУ, Сосновый Бор*
[2]*Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения - филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург*
[3]*Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва*
[4]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЯРИЗОВАННОГО УКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложен механизм деградации многослойных диэлектрических покрытий под действием УКИ излучения, основанный на универсальной поляритонной модели.

V.S. MAKIN[1,2], V.V. TRUBAEV[2], R.S.MAKIN[3]
[1]*Institute for Nuclear Energetic, Sosnovy Bor, Leningrad region*
[2]*Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes - Branch of JSC «Kometa Corporation», Saint-Petersburg*
[3]*Russian University of Transport (RUT (MIIT), Moscow*
[4]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

MECHANISM OF MULTILAYER DIELECTRIC COATINGS DEGRADATION UNDER POLARIZED ULTRASHORT LASER IRRADIATION

The mechanism of multilayer dielectric layers degradation under ultrashort pulsed irradiation is proposed based on universal polariton model.

Понимание механизмов разрушения многослойных диэлектрических покрытий (МДП) важно для создания зеркал для мощного УКИ излучения современных и вновь создаваемых лазерных комплексов. Проанализируем известные экспериментальные результаты [1, 2] и предложим механизм разрушения таких покрытий.

В [1] серией линейно поляризованного УКИ излучения (λ = 796 нм, τ = 450 фс, $N \leq 10^5$) облучали высокоотражающие МДП HfO_2/SiO_2, полученные с использованием ионного напыления. Обнаружены последовательные стадии деградации зеркал: а – образование нановыступов (рис. 1a); б – формирование ориентированных поляризацией лазерного излучения (ЛИ) решеток с $g \parallel E$ и $d_{min} \approx 100$ нм (рис. 1b); в – расширение области деградации (рис. 1c). Образование

нановыступов и решеток носило кумулятивный характер. Предложим механизм разрушения МДП, основываясь на универсальной поляритонной модели (УПМ). Начальная стадия а (см. рис. 1а) связана с образованием локализованных поверхностных плазмонов (ЛПП), когда $\omega_p/\sqrt{2} \approx \omega_0$, где ω_p, ω_0 – плазменная и лазерная частота, соответственно (хаотический характер локальных разрушений). На стадии б (см. рис. 1b) с ростом N за счет роста концентрации свободных носителей в зоне проводимости $\omega_p/\sqrt{2} > \omega_0$ и на границе плазма HfO_2 – вакуум возбуждаются поверхностные плазмон поляритоны (ППП). Интерференция их пространственных гармоник вызывает образование решеток с $g \parallel E$ и $d_{min} = \lambda/8\eta \approx 100$ нм, которые (стадия в) когерентно транслируются на периферийные области зоны облучения (см. рис. 1с). В случае, когда энергии ЛИ оказывается недостаточно для трансляции структур, рост единичной (или нескольких соседних) нановпадины в направлении $s \perp E$ [2] осуществляется за счет переноса энергии возбуждаемыми канальными ППП (КППП), и область нановпадин оказывается промодулирована решеткой $G \perp E$ с периодом $D \approx 200$ нм (интерференция пространственных гармоник КППП).

Таким образом, в рамках УПМ показано, что деградация МДП в режиме воздействия серии линейно поляризованного УКИ излучения обусловлена интерференцией с участием ППП, КППП и ЛПП.

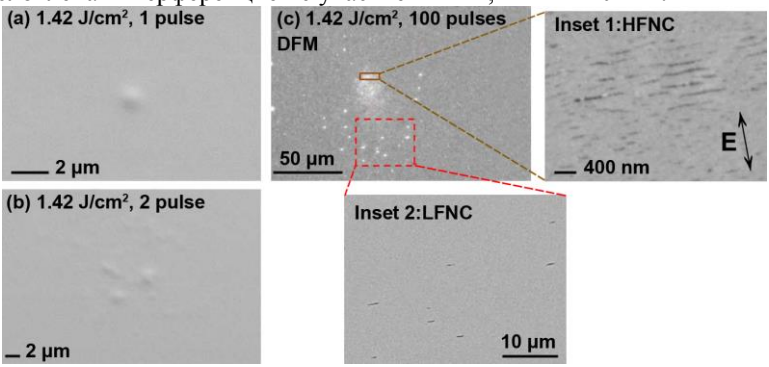


Рис. 1. Эволюция рельефа поверхности МДП HfO_2/SiO_2, облученной серией импульсов линейно поляризованного излучения (λ = 796 нм, τ = 450 фс, Q = 1,42 Дж/см^2), в зависимости от N, вставки 1, 2 показывают увеличенные участки зоны облучения, направление поляризации показано стрелкой

Список литературы

1. Velpula P.K., et. al. // Optics Letters. 2019. V. 44. No. 21. P. 5342.
2. Rasedujjuman Md., et. al. // Optics Express. 2018. V. 26. No. 19. P. 24444.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. МЫСЛИЦКАЯ, А.В. ЦИБУЛЬНИКОВА[1],
П.Л. АГАФОНОВА, Р.В. ЗУБАВИЧЮС, И.И. ЛЯТУН[1]
Калининградский государственный технический университет
[1]Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА АНОДИРОВАНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТИТАНА

Представлены результаты исследований плазмонных свойств, генерируемых на анодированной титановой фольге в присутствии оксидной островковой пленки. Получены спектры отражения методом спектроскопической эллипсометрии.

N.A. MYSLITSKAYA, A.V. TCIBULNIKOVA[1], P.L. AGAFONOVA,
R.V. ZUBAVICHIUS, I.I. LYATUN[1]
Kaliningrad State Technical University
[1]Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad

EFFECT OF TITANIUM FOIL ANODATION MODE ON THE PROPERTIES OF MODIFIED SURFACES OF TITANIUM

The results of research of plasmonic properties generated by anodized titanium foil in the presence of islet oxide film are demonstrated in this work. Reflectance spectra measured by spectroscopic ellipsometry technique are discussed.

Получение пористых поверхностей с заданными свойствами при электрохимическом анодировании металлов является достаточно перспективным и в то же время простым методом [1-3]. Анодированные поверхности титана широко используются в электронике в фотоэлектрических преобразователях энергии, в мемристорах, также в медицине как покрытие титановых имплантов [2].

В работе на собранной установке с двойным катодом были получены анодные пленки при различном напряжении в цепи в разных электролитах. Двойной катод и анодная пластина из титана были помещены в стакан с электролитом и подключены к источнику постоянного напряжения. Анодирование проводилось при постоянном напряжении в цепи, сила тока регистрировалась с помощью цифрового амперметра. В начале процесса сила тока резко увеличивалась до максимального значения (рис. 1а), а затем плавно уменьшалась со временем по гиперболическому закону. Уменьшение силы тока в цепи

можно объяснить увеличением сопротивления за счет увеличения толщины диэлектрической оксидной пленки на анодной титановой пластине. Можно сделать вывод, что сопротивление увеличивается со временем анодирования с постоянной скоростью.

При малых временах анодирования образуются островковые пористые оксидные пленки. Плазмонные оптические свойства шероховатой поверхности титана во многом определяются толщиной данной оксидной пленки. Диэлектрические и оптические свойства полученных образцов были измерены на спектральном эллипсометре (Horiba Yobin Yvon) с программным обеспечением DeltaPsi2.

На рис. 1b представлены спектры коэффициента отражения для поверхностей, полученных при различных режимах. Минимумы в спектрах отражения связаны с плазмонным поглощением в образцах на резонансной длине волны (580, 740, 810, 860 нм), что в свою очередь зависит от размеров микроструктур анодной пленки. Как видно из рис. 1b, плазмонный резонанс смещается в красную область, так же в спектрах отражения наблюдается уширение. Таким образом, путем изменения величины напряжения в процессе анодирования методом спектральной эллипсометрии можно контролировать свойства полученных анодированных поверхностей.

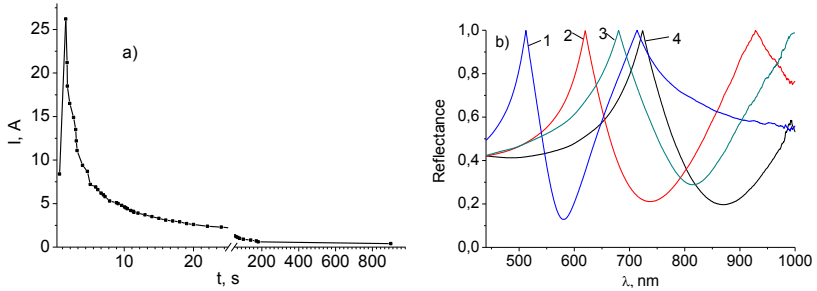


Рис. 1. Зависимость силы тока в цепи при анодировании титана (a); спектры коэффициента отражения анодированной поверхности титана при режимах (b): t = 50 с при U = 25 В (1); t = 70 с при U = 40 В (2); t = 120 с при U = 40 В (3); t = 10 с при U = 45 В (4)

Список литературы

1. Цибульникова А.В. Слежкин В.А., Зюбин А.Ю., Брюханов В.В. //«Ломоносов-2018». Секция Физика. Сборник тезисов. М., 2018. С. 588-589.

2. Гвоздовская Е.А., Тимошевич И.В. и др. // Доклады БГУИР. 2016. № 5 (99). С. 48-53.

3. Спиридонов Б.А., Небольсин В.А. и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6 (2). С. 65-69.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[1,2], С.Н. НЕСМЕЛОВ[1], С.М. ДЗЯДУХ[1], Т.Н. КОПЫЛОВА[1], К.М. ДЕГТЯРЕНКО[1]
[1]*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
[2]*Сибирский физико-технический институт ТГУ, Томск*

ИМПЕДАНС ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР С ТЕРМОАКТИВИРОВАННОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЕЙ

В широком диапазоне условий изучен импеданс светоизлучающих структур с эмиссионным слоем (2-N,2-N,8-N-тетракис(4-метоксифенил)-(дибензотиофен-5,5-диоксид)-2,8-диамин), в котором реализуется термоактивированная замедленная флуоресценция. Из анализа графиков Коула-Коула и частотных зависимостей импеданса определены свойства релаксационных процессов при различных смещениях. Предложена эквивалентная схема многослойной структуры и определены значения параметров ее элементов при различных температурах и напряжениях смещения.

A.V. VOITSEKHOVSKII[1,2], S.N. NESMELOV[1], S.M. DZYADUKH[1], T.N. KOPYLOVA[1], K.M. DEGTYARENKO[1]
[1]*National Research Tomsk State University*
[2]*Siberian Physical-Technical Institute TSU, Tomsk*

IMPEDANCE OF OLED STRUCTURES WITH THERMALLY ACTIVATED DELAYED FLUORESCENCE

In a wide range of conditions, the impedance of light-emitting structures with an emission layer (2-N, 2-N, 8-N-tetrakis (4-methoxyphenyl) - (dibenzothiophen-5,5-dioxide) -2,8-diamine), in which thermally activated delayed fluorescence is realized. From the analysis of the Cole-Cole plots and the frequency dependences of the impedance, the properties of relaxation processes at various biases are determined. An equivalent circuit of a multilayer structure is proposed and the values of the parameters of its elements are determined at various temperatures and voltage biases.

Развитие методов изучения электрических свойств многослойных структур, перспективных для использования в органических светоизлучающих диодах (ОСИД), необходимо для улучшения характеристик ряда приборов органической оптоэлектроники [1, 2]. При создании ОСИД перспективно использование новых типов слоев с термоактивированной замедленной флуоресценцией (TADF-слоев) [3]. В

докладе приведены результаты исследования импеданса многослойной структуры ITO/PEDOT:PSS/α-NPD/TADF-слой/BCP/LiF/Al), в которой смесь диоксидов индия и олова выполняет роль анода, слои PEDOT:PSS и α-NPD предназначены для инжекции и транспорта дырок, органический материал BCP использован для формирования электрон-транспортного и холл-блокирующего слоя, а катод образован слоями LiF и Al [4, 5]. Действительная и мнимая части импеданса измерялись в диапазоне температур от 10 до 310 К при частотах от 100 Гц до 2 МГц.

По виду вольт-амперных характеристик определено, что исследованные структуры являются приборами, действующими на носителях заряда обоих типов (электронах и дырках). Построены графики Коула-Коула при различных температурах и напряжениях смещения. Установлено, что при больших прямых смещениях импеданс ОСИД-структуры определяется одним релаксационным процессом, а при малых смещениях – несколькими процессами. Показано, что при прямых смещениях через ОСИД-структуру протекает ток, ограниченный пространственным зарядом.

Предложена эквивалентная схема ОСИД-структуры (CR-CR-CR-CR), которая позволяет объяснить частотные зависимости импеданса. Различные элементы эквивалентной схемы связаны с различными слоями в ОСИД-структуре. Найдены зависимости значений CR-элементов эквивалентной схемы от напряжения смещения. Показано, что при увеличении прямого смещения на структуре сопротивления RC-цепочек во всех случаях уменьшаются, а емкости ведут себя более сложным образом. Определены зависимости толщин обедненных и квазинейтральных слоев от напряжения смещения. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными теоретической работы [6]. Для более полной электрической диагностики ОСИД структур исследованного типа необходимо проводить измерения импеданса при более высоких температурах и более низких частотах.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проекта № 18-43-700005.

Список литературы

1. Wu S., Li S. et. al. // Sci. Reports. 2016. V. 6. P. 25821.
2. Jou J.N., Kumar S. et. al. // J Mater. Chem. C. 2015. V. 3 (13). P. 2974.
3. Endo A., Ogasawara M. et. al. // Adv. Mater. 2009. V. 21. P. 4802.
4. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N. et. al. // Russ. Phys. J. 2019. V. 62. P. 306.
5. Зятиков И.А., Войцеховский А.В. и др. // Изв. высш. учеб. завед. Физика. 2015. Т. 58 (8/2). С. 252-255.
6. Nguyen N.D., Schmeits M. // Phys Stat Solidi A. 2006. V. 203(8). P. 1901.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. АВЕРИН, П.И. КУЗНЕЦОВ, В.А. ЖИТОВ,
Л.Ю. ЗАХАРОВ, В.М. КОТОВ
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

УЗКОПОЛОСНЫЙ МПМ-ДЕТЕКТОР ВИДИМОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ZnCdSe/ZnSSe/GaAs

Представлены результаты экспериментальных исследований МПМ-диодов в качестве узкополосных фотодетекторов видимой части спектра. Детектор реализован в виде встречно-штыревых МПМ (металл-полупроводник-металл) Шоттки барьерных контактов к гетеробарьерной структуре ZnCdSe/ZnSSe/GaAs. Детектор обеспечивает узкополосный отклик (FWHM = 4.3 нм) на длине волны 460 нм, резкий спад фоточувствительности в коротковолновой части сигнала отклика, высокую амперваттную чувствительность и низкий темновой ток.

S.V. AVERIN, P.I. KUZNETZOV, V.A. ZHITOV,
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

NARROW-BAND VISIBLE DETECTOR ON THE BASE OF ZnCdSe/ZnSSe/GaAs HETEROSTRUCTURE

The results of experimental study of the MSM diodes as narrow-band detectors of the visible part of the spectrum are presented. Detector is implemented in the form of interdigitated MSM (metal-semiconductor-metal) Schottky barrier contacts to ZnCdSe/ ZnSSe/GaAs heterobarrier structure. Detector provides narrow-band response (FWHM = 4.3nm) at the wavelength of 460 nm, sharp decrease in photosensitivity in the short-wavelength part of the response signal, high current sensitivity and low dark current.

МПМ-фотодетектор реализован на основе встречно-штыревых Шоттки барьерных контактов к гетеробарьерной структуре ZnCdSe (132 нм) /ZnSSe (805 нм), выращенной методом MOVPE на полуизолирующей подложке GaAs толщиной 300 нм. Методами фотолитографии на поверхности гетероструктуры сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-диода с шириной 2 мкм и расстоянием между ними 4 мкм. В качестве металла, формирующего барьер Шоттки, использовался Ni. Высота потенциального барьера в исследуемой системе контактов МПМ,

согласно измерениям, составила 1,1 эВ. Общая площадь детектора равна 100 х 100 мкм^2.

Исследовано влияние гетероструктуры ZnCdSe/ZnSSe/GaAs на характеристики спектрального отклика МПМ-диода. На рис. 1 представлен спектр сигнала отклика детектора при различных напряжениях смещения. Детектор достаточно узкополосен и позволяет обеспечить высокий уровень фильтрации полезного информационного сигнала в видимой части спектра. На длине волны 460 нм FWHM сигнала отклика составляет 4,3 нм и является наименьшей из известных и опубликованных в литературе.

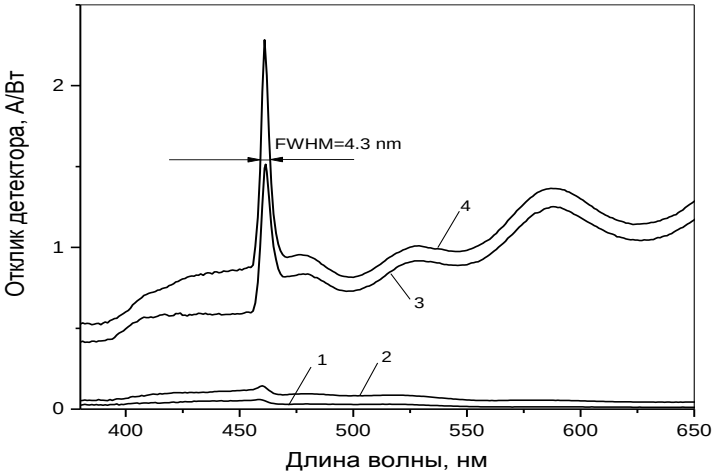


Рис. 1. Спектр сигнала фотоотклика МПМ-детектора:
1 - смещение 5 В, 2 - 10 В, 3 - 20 В, 4- 30 В

При напряжении смещения 30 В сигнал фотоотклика МПМ-диода на длине волны 460 нм с учетом потерь на отражение от встречно-штыревых контактов соответствует ампер-ваттной чувствительности 2,3 А/Вт, а темновой ток равен $5\cdot10^{-10}$ А, что сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnMgS/GaP [1].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-07-00259, грант 17-07-00205).

Список литературы

1. Averin S.V., Kuznetzov P.I., Zhitov V.A., Zakharov L.Yu., Kotov V.M., Alkeev N.V. // Optical and Quantum Electron. 2016. V. 48(5). P. 303.

УДК 535(06)+004(06)

М.А. ГОРЯЕВ[1], Р.А. КАСТРО[1], А.А. КОНОНОВ[1],
Н.И. АНИСИМОВА[1], А.В. КОЛОБОВ[1,2]
[1]*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург*
[2]*Национальный институт передовых промышленных наук и технологий, Цукуба, Япония*

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР $Ge_2Sb_2Te_5$/Si

Исследованы спектры фото-ЭДС в композициях из аморфных и кристаллических слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ на поверхности кремния. Обнаружено, что величина изменения фото-ЭДС для аморфных слоев на порядок больше, чем кристаллических.

M.A. GORYAEV[1], R.A. CASTRO[1], A.A. KONONOV[1],
N.I. ANISIMOVA[1], A.V. KOLOBOV[1,2]
[1]*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg*
[2]*National Institute of Advanced Industrial Science & Technology, Tsukuba, Japan*

PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF $Ge_2Sb_2Te_5$/Si STRUCTURES

The photo-EMF spectra in the compositions of amorphous and crystalline layers $Ge_2Sb_2Te_5$ on the silicon surface are investigated. It was found the photo-EMF changes for amorphous layers is by an order of magnitude greater than for crystalline.

В устройствах энергонезависимой памяти широко используются фазопеременные материалы, характеризуемые резким контрастом свойств между кристаллической и аморфной фазами. Одними из наиболее востребованных материалов являются сложные халькогениды системы Ge-Sb-Te [1]. Исследование особенностей фотостимулированных процессов в структурах позволяет определить механизмы переноса носителей заряда, а также оценить целый ряд микроскопических параметров изучаемых соединений [2-4]. В данной работе исследовались спектры фото-ЭДС в структурах на основе аморфных и кристаллических слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ толщиной порядка 50 нанометров, полученных методом ВЧ магнетронного распыления при комнатной температуре на кремниевые подложки.

Измерения фото-ЭДС образцов проводилось конденсаторным методом [5] при модулированном освещении. Для оценки эффективности внутреннего фотоэффекта измеряемые сигналы ΔU нормировались на одинаковое количество падающих на образец квантов света.

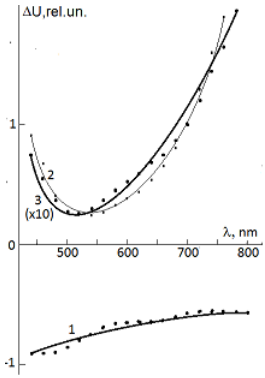


Рис. 1. Спектры фото-ЭДС образцов

На рис. 1 представлены спектры конденсаторной фото-ЭДС исходных образцов кремния (кривая 1) и образцов с нанесенными на поверхность полупроводника слоями $Ge_2Sb_2Te_5$ (кривые 2 и 3). Приведенные результаты показывают, что величина фото-ЭДС исходных образцов (кривая 1) во всей исследованной области спектра уменьшается при увеличении длины волны в соответствии с изменением коэффициента поглощения кремния и знак ЭДС противоположен знаку основных носителей полупроводника – дырок. При нанесении на поверхность полупроводника слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ происходит изменение знака регистрируемого сигнала (кривые 2 и 3). Это может быть связано с тем, что появляется дрейфовая компонента фото-ЭДС, которая определяется дрейфом носителей в поле приповерхностного заряда. Результаты влияния наносимых на поверхность кремния слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ свидетельствуют о том, что в полупроводнике формируется антизапорный изгиб зон.

Одновременно происходит изменение спектров фотоэффекта, что обусловлено спектральной зависимостью величины образующегося изгиба зон при возбуждении. Так при нанесении красителей на поверхность кремния наблюдается смена знака фотопотенциала при освещении в разных областях спектра [6] и сенсибилизированный фотоэффект [7-9]. Величина изменения фото-ЭДС различна для разных слоев: влияние аморфных слоев на порядок больше, чем кристаллических, что можно объяснить структурными особенностями кристаллической и аморфной фазы системы $Ge_2Sb_2Te_5$ [10].

Список литературы

1. Yamada N., Ohno E. et. al. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. 2849.
2. Bordovskii G.A., Kastro R.A. // Optics and Spectroscopy. 2001. V. 90. № 6. P. 884.
3. Castro R.A., Nasredinov F.S. // Glass Physics and Chemistry. 2006. V. 32, № 4. P. 412.
4. Anisimova N.I., Bordovsky V.A. et. al. // Semiconductors. 2010. V. 44. № 8. P. 1004.
5. Акимов И.А. // Оптико-мех. пром. 1966. № 5. С. 4.
6. Комолов С.А., Герасимова Н.Б. и др. // Журн. техн. физ. 2006. Т. 76. № 7. С. 76.
7. Горяев М.А. // Ж. физ. химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.
8. Горяев М.А. // VIII Межд. конф. по фотон. и инф. опт.: сб. научн. тр. М., 2019. С. 605.
9. Goryaev M.A. // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 127. № 1. P. 167.
10. Castro R.A., Kononov A.A. et. al. // Humanities and Science University J. 2018. № 35. P. 32.

УДК 535(06)+004(06)

Д.А. ТЕМИРБАЕВА, Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ
Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ПЛАЗМОН-УСКОРЕННЫЙ ФЕРСТЕРОВСКИЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ТВЕРДЫХ ПЛЕНКАХ

Исследовано влияние плазмонного эффекта наночастиц Ag на процесс переноса энергии между родаминовым и полиметиновым красителями в твердых пленках диоксида титана. Показано, что присутствие плазмонных наночастиц Ag увеличивается эффективность переноса энергии.

D.A. TEMIRBAYEVA, E.V. SELIVERSTOVA, N.Kh. IBRAYEV
The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

PLASMON-ACCELERATED FERSTER ENERGY TRANSFER IN SOLID FILMS

The effect of the plasmonic effect of Ag nanoparticles on the energy transfer between rhodamine and polymethine dyes in solid films of titanium dioxide is studied. It is shown that the presence of plasmonic Ag nanoparticles increases the energy transfer efficiency.

На сегодняшний день сенсибилизированные красителем солнечные ячейки являются одним из многообещающих видов преобразователей солнечной энергии, так как их изготовление не требует больших затрат и сложной аппаратуры. Одним из путей увеличения эффективности солнечных ячеек является использование ферстеровского переноса энергии (FRET) и плазмонного эффекта наночастиц металлов [1-3].

В данной работе изучен FRET между донором – Родамин 6Ж (Р6Ж) и акцептором – катионным полиметиновым красителем (рис. 1) на поверхности композитных структур на основе диоксида титана и наноструктур «ядро-оболочка». Данные наноструктуры состоят из металлического ядра – наночастицы Ag (с диаметром 20 нм) и оболочки TiO_2, толщиной 6 нм.

Были приготовлены пленки TiO_2 с добавлением наноструктур Ag/TiO_2 с концентрацией 0,5, 1 и 2 масс.%. На поверхность приготовленных пленок адсорбировали молекулы донора или акцептора, либо донорно–акцепторные смеси.

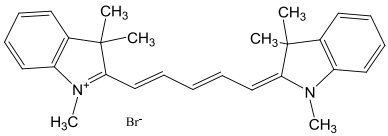


Рис. 1. Структурная формула полиметиновым красителя

Были исследованы спектрально-люминесцентные и кинетические характеристики приготовленных образцов. Возбуждение пленок осуществлялось в полосе поглощения донора с помощью пикосекундного лазера с λ_{ex} = 488 нм.

Измерения показали, что добавление НЧ Ag не влияет на форму и положение полос поглощения и флуоресценции Р6Ж. Добавление НЧ Ag приводит к увеличению оптической плотности красителя (на 6 %), интенсивность флуоресценции при этом увеличивается (на 20 %). Добавление акцептора в пленку приводит к тушению, как интенсивности, так и времени жизни флуоресценции донора вследствие FRET, который увеличивается в присутвии плазмонных наноструктур. Без НЧ серебра эффективность переноса энергии была равна 0,54, при внедрении НЧ Ag она возросла, приблизительно, на 13 %, и была равна 0,67. Максимальная эффективность FRET была зарегистрирована для образцов с долей НЧ Ag равной 1 мас.% (табл. 1).

Таблица 1. Времена жизни донора при наличии и без акцептора, при различной концентрации наноструктур Ag/TiO_2

C_{Ag}, мас.%	без акцептора	с акцептором	
	τ_D, нс	$\tau_{D(A)}$, нс	$E_{ef}=1 - \tau_{D(A)}/ \tau_D$
0	0,79	0,36	0,54
0,5	0,74	0,26	0,66
1	0,80	0,26	0,67
2	0,84	0,32	0,62

Таким образом, исследования показали, что добавление наночастиц $Ag\text{-}TiO_2$ в полупроводниковую пленку приводит к усиленному плазмонами FRET.

Список литературы

1. Qi J., Dang X., Hammond P.T., Belcher A.M. // ACS Nano. 2011. V. 5(9). P. 7108-7116.

2. Hou W., Pavaskar P., Liu Z. et. al. // Energy & Environmental Science. 2011. V. 4(11). P. 4650.

3. Lokman M.Q., Shafie S., Shaban S. et. al. // Materials. 2019. V. 12(13). P. 1-14.

УДК 535(06)+004(06)

А.Р. ГАЗИЗОВ[1,2], М.Х. САЛАХОВ[1,2], С.С. ХАРИНЦЕВ[1,2]
[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет*
[2]*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

ВЫНУЖДЕННОЕ ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА ОДИНОЧНОЙ МОЛЕКУЛЕ, СВЯЗАННОЙ С ПЛАЗМОННЫМ НАНОРЕЗОНАТОРОМ

Проведен анализ гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света на одиночной органической молекуле в зазоре плазмонного нанорезонатора, образованного вершиной металлического зонда микроскопа и золотой подложкой. Рассмотрены линейный и нелинейный режимы ГКР, определены условия его включения и причины селективного усиления линий в спектре ГКР на примере анизотропных молекул красителя порфирина (FBP, H_2P).

A.R. GAZIZOV[1,2], M.K. SALAKHOV[1,2], S.S. KHARINTSEV[1,2]
[1]*Kazan Federal University*
[2]*Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

STIMULATED TIP-ENHANCED RAMAN SCATTERING OF LIGHT ON SINGLE MOLECULE COUPLED TO THE PLASMONIC NANOCAVITY

In this work the analysis of tip-enhanced Raman scattering (TERS) of light on a single organic molecule in the plasmonic nanocavity formed by the tip of a metal probe of a microscope and a gold substrate is carried out. The linear and nonlinear regimes of TERS are considered, the conditions and reasons for the selective enhancement of Raman bands in the TERS spectrum are determined using anisotropic molecules of the free base porphyrin (FBP, H_2P) dye as an example.

Плазмонные нанорезонаторы, образованные металлической наночастицей, расположенной близко к тонкой металлической пленке или другой наночастице, представляют большой интерес для нанофотоники. Их свойства могут быть использованы для оптического сверхразрешения [1], оптоэлектроники [2, 3] и создания новых материалов с увеличенной нелинейностью [4]. Однако интерпретация спектров ГКР, усиленных нанорезонатором, осложнена эффектами деполяризации [5, 6].

Целью работы является исследование эффектов неоднородного усиления спектров ГКР одиночных молекул в линейном и нелинейном режимах. Неоднородное усиление линий связано с типом симметрии

молекулярного колебания. В нелинейном режиме индуцированный дипольный момент на стоксовой частоте ω_ν имеет вид:

$$\mathbf{p}_R(\omega_\nu) = \ddot{\alpha}_\nu \mathbf{E}_{\text{local}}(\omega) + \ddot{\alpha}\mathbf{E}_{\text{images}}(\omega_\nu) + \ddot{\alpha}_\nu^{(3)} \left|\mathbf{E}_{\text{local}}(\omega)\right|^2 \mathbf{E}_{\text{images}}(\omega_\nu),$$

где $\mathbf{E}_{\text{local}}$ – локальное поле на падающей частоте ω, $\mathbf{E}_{\text{images}}$ – локальное поле изображений молекулы в подложке и вершине зонда [7, 8], α, α_ν, $\alpha_\nu^{(3)}$ – поляризуемости электронная, рамановская и кубическая соответственно, определяемые на основе расчетов по теории функционала плотности.

В плазмонном нанорезонаторе три процесса способствуют усилению КР – локализация электрического поля (1), взаимодействие с полями изображений молекулы (2) и динамическое обратное действие стоксовой волны (вынужденное комбинационное рассеяние) (3). Последние два зависят от пространственной ориентации молекулы и заметно влияют на деполяризацию ближнего поля (рис. 1). Из-за этого наблюдаемая колебательная симметрия молекулы изменяется при спектроскопических измерениях с использованием ГКР.

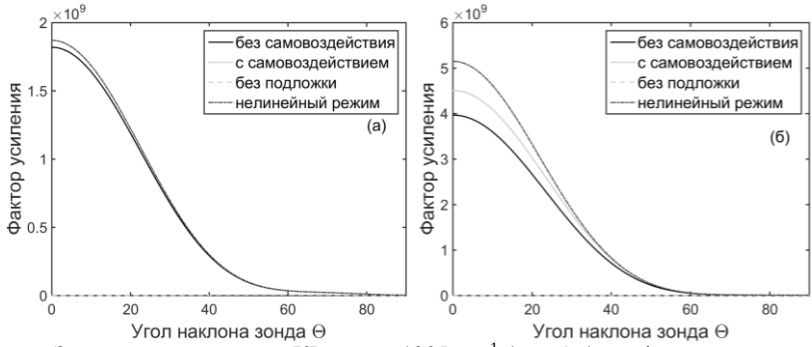


Рис. 1. Зависимость усиления КР линии 1395 см$^{-1}$ (тип A_{1g}) порфирина от наклона зонда при ориентации H_2P параллельно (а) и перпендикулярно (б) к нормали подложки при интенсивности падающего света I_0 = 3 МВт/см^2

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (№19-12-00066).

Список литературы

1. Lee J., Crampton K.T., Tallarida N., Apkarian V.A. // Nature. 2019. V. 568. P. 78-82.
2. Schmidt M.K. et. al.// ACS Nano. 2016. V.10. P.6291–6298.
3. Roelli P., Galland C., Piro N., Kippenberg T.J. // Nat. Nanotecnol. 2015. V. 11. P. 164-169.
4. Tyugaev M.D., Kharitonov A.V., Gazizov A.R. et. al. // JETP Lett. 2019. V. 110 (12).
5. Kharintsev S.S. et. al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. V. 20. P. 24088-24098.
6. Gazizov A.R., Salakhov M.K., Kharintsev S.S. // J. Raman Spectrosc. DOI:10.1002/jrs.5795
7. Lindell I.V., Sten J. C.-E., Kleinman R.E. // J. Electromagnet. Wave. 1994. V. 8. P. 295-313.
8. Zhang C., Chen B., Li Z.-Y. // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. P. 11858-11871.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Г. БИКБАЕВ[1,2], С.Я. ВЕТРОВ[2,1], И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2]
[1]*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ГИБРИДИЗАЦИИ ТАММОВСКИХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ С МОДАМИ ДВУМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД

В работе исследованы оптические и спектральные свойства гибридных мод, образованных в результате связи таммовского плазмон-поляритона с модами двумерных диэлектрических наноструктурированных сред.

R.G. BIKBAEV[1,2], S.Ya. VETROV[2,1], I.V. TIMOFEEV[1,2]
[1]*Kirensky Institute of Physics of Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

INVESTIGATION OF THE HYBRIDIZATION EFFECTS OF TAMM PLASMON-POLARITONS AND MODES OF TWO-DIMENSIONAL NANOSTRUCTURED MEDIA

Optical and spectral properties of hybrid modes excited by coupling the Tamm plasmon-polariton and modes of two-dimensional dielectric nanostructured media are investigated.

В последние годы активно исследуется особый тип поверхностных электромагнитных состояний, которые формируются в виде стоячей поверхностной волны, имеющей нулевое волновое число вдоль границы раздела сред и не переносящей энергии. Уравнение Максвелла для электрического поля в этом случае является точным аналогом одноэлектронного уравнения Шредингера для полубесконечного кристалла, решением которого является таммовское поверхностное состояние. В силу этого, электромагнитный аналог электронного таммовского состояния называется оптическим таммовским состоянием. В случае формирования подобного состояния на границе фотонного кристалла (ФК) и проводящей среды с эффективной диэлектрической проницаемостью (ДП) $\Re\varepsilon_{\mathrm{eff}}(\omega) < 0$, световая волна взаимодействует с поверхностным плазмоном, представляющим собой коллективное колебание газа свободных электронов вблизи поверхности проводника. Такая связанная мода поля излучения и поверхностного плазмонного возбуждения называется таммовским плазмон-поляритоном (ТПП) [1].

Взаимодействие ТПП с другими типами локализованных мод (микрорезонаторная мода, поверхностный или локализованный плазмон-поляритон, экситон) позволяет создать устройства принципиально нового класса [2-3]. Однако, в литературе практически отсутствуют теоретические и экспериментальные работы, посвященные исследованию гибридных мод, образованных в результате связи таммовского плазмон-поляритона и решеточных мод двумерного периодического массива диэлектрических или плазмонных частиц [4].

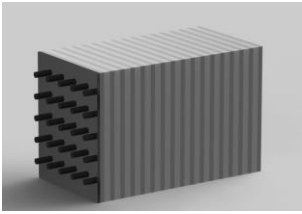


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемой структуры

Исследуемая нами структура представляет собой одномерный фотонный кристалл, сопряженный с тонкой металлической пленкой (рис. 1). На поверхность металлической пленки нанесен буферный слой, на котором в последствии формируется двумерная наноструктурированная решетка из диэлектрических наноцилиндров. Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из двуокиси кремния (SiO_2) и диоксида циркония (ZrO_2). Энергетические спектры структуры исследованы методом конечных разностей во временной области. Установлено, что в подобной системе формируются гибридные моды, образованные в результате связи ТПП с модами двумерной решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (заявка МК-140.2020.2), совместного гранта РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 19-42-240004 и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00053.

Список литературы

1. Kaliteevski M. et. al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76, P. 165415.
2. Symonds C. et. al. // Nano. Lett. 2013, V. 13. P. 3179.
3. Gazzano O. et..al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 232111.
4. Khlopin D. et. al. // Journal of the Optical Society of America B. 2017. V. 34. P. 691.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Г. БИКБАЕВ[1,2], С.Я. ВЕТРОВ[2,1], И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2]
[1]*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ГИБРИДНЫЕ СОСТОЯНИЯ ТАММОВСКИХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ В РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

В настоящей работе показана возможность реализации гибридного состояния за счет связи ТПП и ППП в случае ограничения ФК слоем металл-диэлектрического нанокомпозита. Нанокомпозит состоит из металлических наночастиц, взвешенных в прозрачной матрице, и характеризуется резонансной эффективной диэлектрической проницаемостью.

R.G. BIKBAEV[1,2], S.Ya. VETROV[2,1], I.V. TIMOFEEV[1,2]
[1]*Kirensky Institute of Physics of Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

HYBRID TAMM AND SURFACE PLASMON POLARITONS IN RESONANT PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURE

In this paper, the possibility of hybrid state excitation due to the coupling of TPP and SPP in PhC structure bounded by metal-dielectric nanocomposite is shown. The nanocomposite consists of metallic nanoparticles dispersed in a transparent matrix and is characterized by a resonant effective dielectric permittivity.

Особым типом поверхностных электромагнитных состояний является оптическое таммовское состояние, при котором поле экспоненциально затухает по обе стороны от границы раздела, и может прекращаться перенос энергии вдоль поверхности [1]. Оптическое таммовское состояние может возбуждаться между двумя различными фотонными кристаллами (ФК), имеющими перекрывающиеся запрещенные зоны или между фотонным кристаллом и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, например, металлом или нанокомпозитом (НК) [2, 3]. В последнем случае его также называют таммовским плазмон-поляритоном (ТПП), поскольку поле излучения связывается с поверхностным плазмонным возбуждением.

Рассматриваемая нами ФК-структура представляет собой слоистую среду, ограниченную слоем НК. Слой НК толщиной d_{eff} состоит из

сферических металлических наночастиц, равномерно распределенных в диэлектрической матрице. Эффективная ДП нанокомпозита определяется формулой Максвелл-Гарнетта [4]. Спектры отражения структуры для волн ТМ-типа, рассчитанные методом трансфер-матрицы, изображены на рис. 1 для различных значений фактора заполнения *f*.

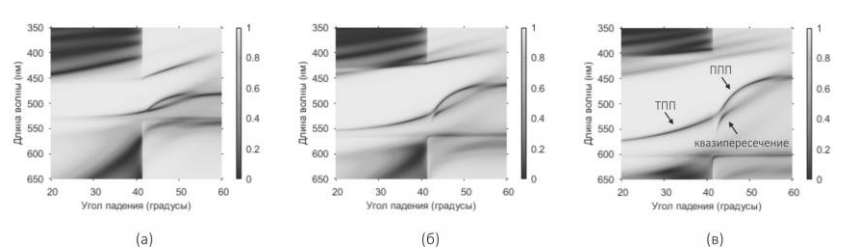


Рис. 1. Спектры отражения ФК, сопряженного со слоем НК, при различных значениях угла падения для волн ТМ-типа, толщина слоя НК d_{eff} = 50 нм, f = 0.1 (а), f = 0.2 (б), f = 0.3 (в)

Из рис. 1 видно, что при углах падения $\theta <= 42^o$ внутри запрещенной зоны ФК наблюдается только ТПП. Угол полного внутреннего отражения не зависит от фактора заполнения f (sin \ theta = 1/n_стекла, $\theta_{ПВО} = 42^o$). При углах больших угла полного внутреннего отражения, на границе раздела НК-воздух возбуждается поверхностный плазмон-поляритон (ППП). При заданных f и углах падения ($43^o < \theta < 45^o$) они связываются, и образуется ТПП-ППП гибридная мода. В спектрах отражения связь двух мод проявляется в виде расщепления спектральных линий. Величина расщепления характеризует величину связи мод, управлять которой можно, изменяя фактор заполнения НК. Следует отметить, что дисперсионные кривые для ТПП и ППП пересекаются повторно в интервале $50^o < \theta < 60^o$.

Работа выполнена при поддержке совместного гранта РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 19-42-240004 и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00053.

Список литературы

1. Виноградов А.П. и др. // УФН. 2010. Т. 180. С. 249-263.
2. Kaliteevski M. et. al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
3. Vetrov S.Ya., Bikbaev R.G., Timofeev I.V. // JETP. 2013. V. 117. P. 988.
4. Maxwell-Garnett J.C. // Philos. Trans. Roy. 1904. V. 203. P. 385.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Г. БИКБАЕВ[1,2], С.Я. ВЕТРОВ[2,1], И.В. ТИМОФЕЕВ[1,2], В.Ф. ШАБАНОВ[1,2]
[1]*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ УВЕЛИЧИВАЮЩИЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В работе предложена модель органического солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе активного слоя, допированного плазмонными наночастицами, и многослойного зеркала. Показано, что интегральное поглощение в активном слое может быть увеличено на 10% по сравнению с оптимизированным планарным солнечным элементом.

R.G. BIKBAEV[1,2], S.Ya. VETROV[2,1], I.V. TIMOFEEV[1,2], V.F. SHABANOV[1,2]
[1]*Kirensky Institute of Physics of Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk*
[2]*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

TAMM PLASMON POLARITONS ENHANCED ABSORPTION IN ORGANIC SOLAR CELLS

The paper proposes a model of an organic solar cell based on Tamm plasmon polariton localized at the boundary of the active layer doped with plasmon nanoparticles and a multilayer mirror. It is shown that the integral absorption in the active layer can be increased by 10% compared to the optimized planar solar cell.

Органические солнечные элементы (ОСЭ) на основе сопряженных полимеров привлекают к себе все большее внимания в связи с их низкой стоимостью, легкостью изготовления и малого веса. Подобные ОСЭ основаны на объемном гетеропереходе, вследствие чего необходимо находить компромисс между эффективностью поглощения фотонов и транспортировки носителей заряда. Толщина активного слоя, в этом случае, составляет не больше 100 нм, что значительно ограничивает эффективность поглощения падающего света. В связи с этим широкое распространение получили методы увеличение поглощения в активном слое за счет внедрения в него плазмонных частиц (серебро, золото, медь) или сопряжение ОСЭ с многослойным отражающим зеркалом [1].

Принципиально новой является идея использования активного элемента, допированного наночастицами, в качестве зеркала, принимающего участие в формирование таммовского плазмон-поляритона [2], локализованного на границе с многослойным зеркалом. Схематическое изображение предложенного ОСЭ представлена на рис. 1.

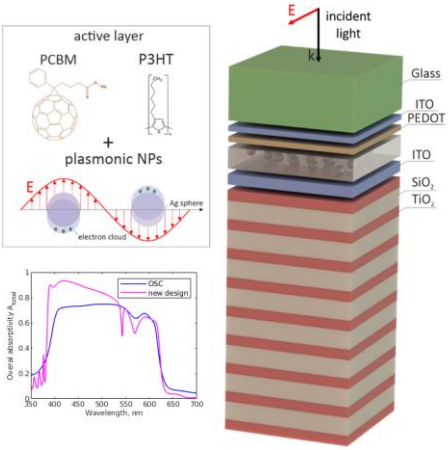


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемой структуры и зависимости интегрально поглощения в активном слое от длины волны падающего излучения

Исследуемая нами структура представляет собой активный слой из P3HT:PC61BM толщиной 50 нм, допированный серебряными наносферами с объемной концентрацией 20 %. В качестве контактов использованы пленки ITO с толщинами 15 нм и 45 нм. Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из двуокиси кремния (SiO_2) с и диоксида титана (TiO_2) с толщинами 75 нм и 40 нм, соответственно. Методом трансфер-матрицы было рассчитано интегральное поглощение в активном слое (поглощение в слое нормированное на солнечный спектр). Показано, что в предложенной модели ОСЭ интегральное поглощения в, исследуемом интервале длин волн, увеличивается на 10 %, в сравнении с аналогичным планарным ОСЭ.

Список литературы

1. Ou Q.-D. et.al., // Adv. Sci. 2016. V. 3, P. 1600123.
2. Kaliteevski M. et.al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76, P. 165415.

УДК 535(06)+004(06)

И.И. КОН, А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА МЕТОДОМ FDTD

В работе приведены данные результатов математического моделирования напряжённостей электромагнитного поля вблизи поверхностей наночастиц золота и серебра. При проведении моделирования исследовались такие параметры как форма частиц, их размеры, длина волны возбуждающего излучения и зависимость эффективного усиление электромагнитного поля в зависимости от расстояния между наночастицами. Показана перспективность полученных результатов для использования в методах контролируемого химического синтеза коллоидных наночастиц золота, серебра и их поверхностей.

I.I. KON, A.Yu. ZYUBIN, I.G. SAMUSEV
Immanuel Kant Baltic Federal State University, Kaliningrad

MATHEMATICAL MODELING OF PLASMON ELECTROMAGNETIC DISTURBANCES NEAR THE SURFACE OF GOLD AND SILVER NANOPARTICLES BY FDTD METHOD

The paper presents the results of mathematical modeling of electromagnetic field intensities near the surfaces of gold and silver nanoparticles. During the simulation were investigated such parameters as: shape of the particles, their size, wavelength of the exciting radiation and the dependence of the effective amplification of the electromagnetic field depending on the distance between the nanoparticles. The prospects of the results obtained for use in methods of controlled chemical synthesis of colloidal nanoparticles of gold and silver and their surfaces are shown.

В основе метода конечных разностей во временной области (FDTD - Finite-Difference Time-Domain) [1] лежит дискретизация уравнений Максвелла по конечно-разностной схеме [2, 3]. Пространству модели сопоставляется сетка из конечного числа регулярно расположенных узлов, в каждом узле задаётся значение одной из компонент электрического или магнитного поля. Отличительной чертой, позволившей FDTD выделиться в отдельный метод, стало особое расположение компонент поля по узлам сетки. Предложенное в оригинальной работе Йи [4], оно позволяет

получать численные решения уравнений Максвелла для очень большого набора задач.

Целью работы является моделирование напряжённостей электромагнитных полей вблизи поверхностей наночастиц в воздушной среде. В работе было выполнено варьирование морфологических параметров частниц для получения максимальных значений напряжённостей электромагнитного поля для применения в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света.

Алгоритм расчёта выполнялся следующим образом: задавалась счётная область, разрешение сетки и граничные условия; внутри счетной области помещалось тело с заданными оптическими и геометрическими параметрами; задавался источник излучения; источник генерировал конечную во времени электромагнитную волну.

Моделирование проводилось с помощью программного пакета Lumerical FDTD Solutions.

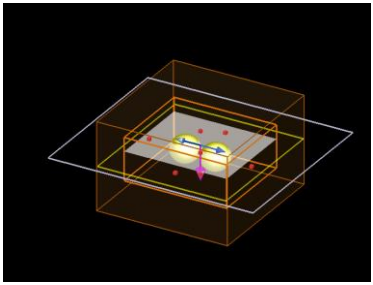


Рис. 1. Вид трёхмерной модели димера золотых наночастиц

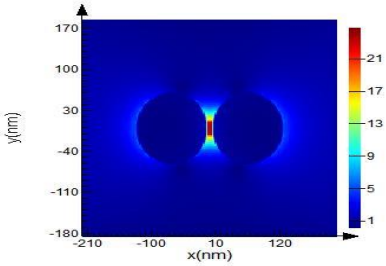


Рис. 2. Локальное распределение напряжённостей электрического поля двух сфер (димер) наночастиц золота

Полученные значения величины электромагнитных полей согласуются с экспериментальными данными.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 19-72-00004.

Список литературы

1. Taflove A. // Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain. 2nd ed. Artech House method, 2000. P. 866.

2. Gelfond A.O. // Calculus of finite differences. 1959.

3. Samarsky A.A. // Introduction to the theory of difference schemes. 1971.

4. Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Trans. Antenn. Propag. 1966. V. 14, P. 302-307.

5. Klimov V.V. // Nanoplasmonics. 2009.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ГОРБАТОВА, Д.И. ХУСЯИНОВ, А.М. БУРЯКОВ, Д.С. ПОНОМАРЕВ[1], Е.Д. МИШИНА

МИРЭА – Российский технологический университет

[1]Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва

ФОТОПРОВОДЯЩИЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕШЕТКИ $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦЕВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Исследованы параметры детектирования для трёх прототипов терагерцевых (ТГц) фотопроводящих антенн (ФПА) со спиральной топологией электродов, изготовленных на сверхрешетке $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$: 1) LS-0; 2) LS (с диэлектрическим покрытием между функциональным слоем и металлизацией); 3) LS-P (с интегрированными плазмонными решетками). Получены временные формы детектируемых ТГц импульсов и их Фурье-преобразованные частотные спектры. Показано увеличение чувствительности у LS-P на 2 порядка в сравнении с LS-0 и LS. Исследовано влияние поляризации зондирующего луча на амплитуду ТГц сигнала, детектируемого LS-P.

A.V. GORBATOVA, D.I. KHUSYAINOV, A.M. BURYAKOV, D.S. PONOMAREV[1], E.D. MISHINA

MIREA – Russian Technological University

[1]V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, Moscow

PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS BASED ON THE $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$ SUPERLATTICE FOR TERAHERTZ SPECTROSCOPY SYSTEMS

The detection parameters were studied for three prototypes of terahertz (THz) photoconductive antennas (PCA) with a spiral topology of electrodes manufactured on the $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$ superlattice: 1) LS-0; 2) LS (with a dielectric coating between the functional layer and metallization); 3) LS-P (with integrated plasmon gratings). The temporal forms of the detected THz pulses and their Fourier-converted frequency spectra were obtained. It was shown that the increase in sensitivity of the LS-P was 2 orders of magnitude compared with LS-0 and LS. The influence of the probe beam polarization on the amplitude of the THz signal detected by the LS-P was studied.

В работах [1-4] показано, что использование плазмонных электродов значительно увеличивает чувствительность ТГц детекторов. Повышение

квантовой производительности устройств происходит вследствие достижения наноразмерной длины пробега носителей заряда и увеличения количества сгенерированных фотоносителей в субпикосекундном масштабе времени [1].

В данной работе исследовались параметры детектирования ТГц импульсов ФПА со спиральной геометрией электродов, изготовленными методом фотолитографии на сверхрешетке $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0,48}As$, выращенной методом молекулярно лучевой эпитаксии в ИСВЧПЭ РАН. Было изготовлено 3 прототипа: 1) LS-0 (электроды были нанесены непосредственно на слой $In_{0.53}Ga_{0.47}As$); 2) LS (с диэлектрическим покрытием Si_3N_4 между $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ и металлизацией); 3) LS-P (с интегрированными плазмонными решетками).

Исследования проводились методом ТГц спектроскопии временного разрешения. Оптическая накачка осуществлялась Ti:sapphire фемтосекундным лазером MaiTai Spectra-physics. В качестве генератора ТГц импульсов использовалась микрополосковая антенна на основе низкотемпературного GaAs. Получены временные формы ТГц сигналов, детектированных ФПА, и их частотные спектры, вычисленные методом Фурье-преобразования. Увеличение чувствительности LS-P по сравнению с LS-0 и LS составило 4 и 300 раз, соответственно. Изготовленные ФПА детектируют сигнал в низкочастотной области ТГц спектра (0,01 - 0,4 ТГц). Для LS-P было исследовано влияние поляризации зондирующего оптического луча на амплитуду детектируемого ТГц сигнала. Максимальная амплитуда ТГц импульса наблюдалась в случае s-поляризации, когда колебание вектора напряженности электрического поля происходит в направлении, перпендикулярном плазмонным электродам. Также для всех антенн была исследована зависимость амплитуды детектируемого ТГц сигнала от мощности зондирующего луча.

Работа поддержана грантом централизованного фонда РТУ МИРЭА № НИЧ-44 и Российским научным фондом (№ 19-72-10165)

Список литературы

1. Berry C.W., Wang N., Hashemi M.R., Unlu M., Jarrahi M. // Nat. Commun. 2013. V. 4. P. 1622.

2. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. // Laser Photon. Rev. 2017. V. 11. P. 1600199.

3. Yardimci N.T., Jarrahi M. // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 42667.

4. Berry C.W., Hashemi M.R., Jarrahi M. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 081122.

УДК 535(06)+004(06)

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В СРЕДАХ С МАГНИТОПЛАЗМОННЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Теоретически исследовано фарадеевское вращение в средах, содержащих магнитоплазмонные включения: сферические слоистые наночастицы или двухчастичные кластеры. Проведены расчеты поляризационных характеристик световых волн, распространяющихся в таких средах, и исследовано влияние на эти характеристики размера ферромагнитной составляющей включения.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

THE FARADAY EFFECT IN MEDIA WITH MAGNETOPLASMONIC INCLUSIONS

The Faraday rotation in media containing magnetoplasmonic inclusions: spherical layered nanoparticles or two-particle clusters is theoretically investigated. The polarization characteristics of light waves propagating in such media were calculated, and the influence of the ferromagnetic component size of the inclusion on these characteristics was investigated.

Композитные системы, объединяющие в себе наноструктуры с магнитными и плазмонными свойствами, вызывают повышенный интерес исследователей в связи с широким спектром практических приложений магнитооптических эффектов, усиление которых наблюдается в таких системах.

Среда, содержащая наночастицы с ферромагнитным ядром и оболочкой из благородного металла или кластеры, состоящие из однородных ферромагнитной и плазмонной наночастиц, характеризуется эффективной диэлектрической проницаемостью $\overleftrightarrow{\varepsilon}^{eff}$, которая в рассматриваемом случае является тензором. Используя модель Максвелла Гарнетта [1], для этого тензора можно получить следующее выражение

$$\overleftrightarrow{\varepsilon}^{eff}(\omega)=\varepsilon_d\left(\mathbf{I}-4\pi n\overleftrightarrow{\alpha}(\omega)/3\right)^{-1}\left(\mathbf{I}+8\pi n\overleftrightarrow{\alpha}(\omega)/3\right),$$

где I – единичная матрица, $\overleftrightarrow{\alpha}(\omega)$ – тензор дипольной динамической проницаемости включения [2], ε_d – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей включения, n – их концентрация.

Зная компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости, можно определить угол фарадеевского вращения φ_F и эллиптичность η на единицу длины пути света в среде. Если свет распространяется вдоль оси z, совпадающей с направлением намагниченности ферромагнитной составляющей включения, то

$$\varphi_F = (\omega/2c)\mathrm{Re}\left[i\varepsilon_{xy}^{eff} \Big/ \sqrt{\varepsilon_{xx}^{eff}} \right], \qquad \eta = (\omega/2c)\mathrm{Im}\left[i\varepsilon_{xy}^{eff} \Big/ \sqrt{\varepsilon_{xx}^{eff}} \right],$$

где ω – частота световой волны, c – скорость света в вакууме.

На рис. 1 представлены результаты расчетов угла Фарадея на единицу длины пути света в среде, содержащей наночастицы с кобальтовым ядром и серебряной оболочкой (см. рис. 1*а*) или двухчастичные кластеры из однородных кобальтовой и серебряной наночастиц (см. рис. 1*б*).

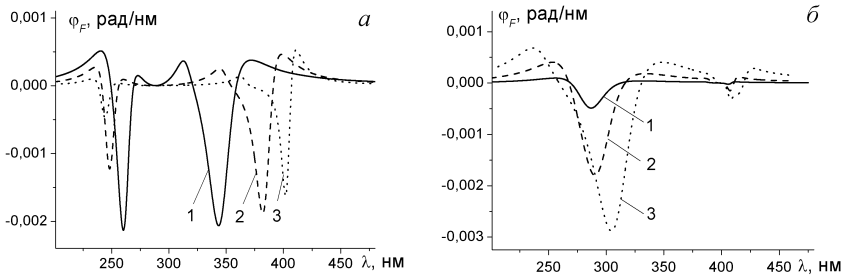


Рис. 1. Угол фарадеевского вращения в среде: со слоистыми наночастицами при разных отношениях 0.9 (1), 0.7 (2), 0.5 (3) радиуса кобальтового ядра к радиусу всей частицы, равному 10 нм (*а*); с двухчастичными кластерами при разных значениях радиуса кобальтовой частицы 3 (1), 5 (2), 7 (3) нм, радиус серебряной частицы составлял 5 нм, расстояние между частицами – 17 нм (*б*)

Как видно из рис. 1, наличие плазмонной составляющей у частицы или кластера приводит к появлению магнитооптического отклика в диапазоне длин волн, соответствующем плазмонному резонансу благородного металла. Изменяя параметры и состав слоистой частицы или двухчастичного кластера, можно получать существенные магнитооптические эффекты в определенной спектральной области, что является важным с практической точки зрения, так как эти эффекты положены в основу принципов работы многих оптических устройств нового поколения.

Список литературы

1. Varytis P., Pantazopoulos P.A., Stefanou N. // Phys. Rev. B. 2016. V. 93. P. 214423.
2. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. // Оптический журнал. 2018. Т. 85. Вып. 9. С. 3.

УДК 535(06)+004(06)

Р.А. КАСТРО, И.О. ПОПОВА, Л.М. СМИРНОВА, Е.Б. ШАДРИН[1]
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург
[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ПРУСТИТА

Исследован полярный магнитооптический эффект в монокристаллах прустита и предложена модель наблюдаемых явлений, основанная на связи природы диэлектрических релаксаторов материала с неподеленной парой электронов, фиксированной на $4s^2 4p^3$ – гибридизованной орбитали иона As^{3+}, незадействованной в создании кристаллического каркаса.

R.A. CASTRO, I.O. POPOVA, L.M. SMIRNOVA, E.B. SHADRIN[1]
Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg
[1]*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

MAGNETO-OPTICAL AND RELAXATION PHENOMENA IN PROUSTITE MONOCRYSTALS

The polar magneto-optical effect in proustite single crystals is investigated and model of the observed phenomena is proposed based on the relationship between the nature of dielectric relaxators and unshared pair of electrons fixed on $4s^2 4p^3$ - hybridized orbital of the As^{3+} - ion, which was not involved in creating the crystalline framework.

В работе выполнены исследования поворота плоскости поляризации отраженного от кристалла Ag_3AsS_3 света в полярной магнитооптической геометрии. Обнаружен поворот на 0,20 градуса дуги (12 минут) в поле 9000 Гс, что соответствует $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ градуса дуги на 1 гаусс (0,76 угловой секунды на 1 гаусс). Обнаружена строгая линейность поворота по величине индукции магнитного поля. Установлено, что эффект поворота является четным (независящим от направления магнитного поля), а его величина уменьшается на 40 % с постоянной времени 6 секунд при подсветке образца светом с длиной волны 4700 Å, шириной полосы излучения 840 Å и плотностью мощности 10 мВт/см^2.

Исследованы диэлектрические спектры (ДС) монокристаллов прустита в температурном интервале 313 – 475 К. Показано, что поведение ДС подчиняется модели Коула-Коула для случая симметричного распределения релаксаторов по временам релаксации. Установлено, что

наличие максимумов на температурной зависимости функции распреления времен релаксации $G(\tau)$ по их значениям определяется совершением в кристалле Ag_3AsS_3 смешанных электронно-суперионных фазовых переходов (ФП) при $T \approx 320$ К и $T \approx 413$ К. Проведен анализ структуры электронной гибридизации ионов Ag^{3+}, As^{5+} и S^{3+} в решетке прустита, показавший, что они находятся в состояниях $4d^2(1)5s^1(1)5p_x^0$, $4s^2(1)4p_x^1(1)4p_y^1(1)4p_z^1(1)$, $3p_x^1(1)3p_y^1(1)3p_z^2(2)3d_{xy}^0(1)$ – гибридизации соответственно. При этом, ион As^{5+}, находясь в тетраэдрической координации, имеет неподеленную электронную пару на $4s^24p^3$-орбитали, незадействованной в создании каркасных связей. Высказано предположение об определяющей роли пары в формировании магнитных, релаксационных и фоточувствительных свойства кристалла прустита. Наличие неподеленных электронных пар порождает магнитный отклик, что обусловлено прецессией во внутреннем магнитном поле Дроссельхауса (центр инверсии отсутствует) одиночного спина в составе σ-связи As-S [1]. В работе также установлено, что имеет место противоположный эффект: электрогирационный поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света во внутреннем диффузионном электрическом поле [2], возникающем в образце благодаря эффекту Дембера [3] и определяемом различием подвижностей электронов и дырок при генерации носителей заряда внешней подсветкой. Данный эффект частично (на 40 %) подавляет поворот плоскости поляризации при внешней подсветке образца.

Температурная зависимость амплитуды максимума функции $G(\tau)$ имеет особенности, обусловленные совершением смешанных электронно-суперионых ФП переходов в прустите. Электронная составляющая наблюдаемых ФП отражает коллективный релаксационный отклик массива неподеленных электронных пар, фиксированных на свободной $4s^24p^3$ – орбитали иона As^{5+}.

Список литературы

1. Эмануэль Н.М., Кузьмин М.Г. Экспериментальные методы химической кинетики. Изд. МГУ, 1985.

2. Deliolanis N.C, Vanidhis E.D., Vainos N.A. // Appl. Phys. B. 2006. V. 85(4). P. 591.

3. Роках А.Г., Стецюра С.В., Сердобинцев А.А. // Изв.Сар.Ун.Сер.Физ. 2005. Т. 5. № 1. С. 92.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. ПЕНЬКОВ, И.Р. АЛИМБЕКОВ, П.П. НЕЯСОВ,
М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ЭКСИТОННЫЕ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СПЕКТРЫ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ АНТРАЦЕНА В ПОРИСТЫХ АДСОРБЕНТАХ, КОЛЛОИДНЫХ И ГОМОГЕННЫХ РАСТВОРАХ

С целью получения нанореакторов для спин-селективных реакций, синтезированы и исследованы оптическими методами нанокристаллы антрацена в матрицах.

S.A. PEN'KOV, I.R. ALIMBEKOV, P.P. NEYASOV,
M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

EXCITON AND MOLECULAR SPECTRA OF ANTHRACENE FLUORESCENCE IN POROUS ADSORBENTS, COLLOIDAL AND HOMOGENEOUS SOLUTIONS

In order to obtain nanoreactors for spin-selective reactions, anthracene nanocrystals in matrixes were synthesized and studied by optical methods.

Органические наночастицы, также как и наночастицы металлов и неорганических полупроводников обладают свойствами, отличными от макрокристаллов, одиночных атомов и молекул. Перспективным современным методом исследования динамических процессов в таких наночастицах является регистрация магнитополевых эффектов, а также спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Ранее в [1, 2] были проведены теоретические исследования влияния постоянного магнитного поля (магнитополевой эффект), а также СВЧ поля (спектры ОДМР) [3-6] на спин-селективные процессы с участием электронных возбуждений в подобных наноструктурах. Известно, что измерения магнитополевого отклика и ОДМР дают уникальную информацию о характере движения триплетных молекулярных экситонов и о структуре среды, в которой они находятся [1-6].

В данной работе были синтезированы нанокристаллы антрацена в водных растворах и в нанопорах твердых адсорбентов, а также

исследованы характеристики таких систем методами оптической спектроскопии и динамического рассеяния света. Нанокристаллы антрацена создавались методом переосаждения, описанном в [7, 8]. Исследованиями динамического рассеяния света в полученных коллоидных растворах были установлены размеры нанокристаллов – в диапазоне 100-200 нанометров (рис. 1). Спектры оптического поглощения, представленные на рис. 2, демонстрировали красное смещение порядка 0.17 эВ, свойственное молекулам антрацена в кристаллическом состоянии, а также характерное для коллоидных растворов увеличение коэффициента экстинкции в области длин волн свыше 400 нм. Таким образом, в работе были получены и исследованы нанокристаллы антрацена в водных растворах и адсорбентах, которые представляют собой нанореакторные матрицы с требуемыми спектральными и структурными характеристиками, и которые могут обладать нетипичными магнитополевыми откликами и ОДМР-спектрами.

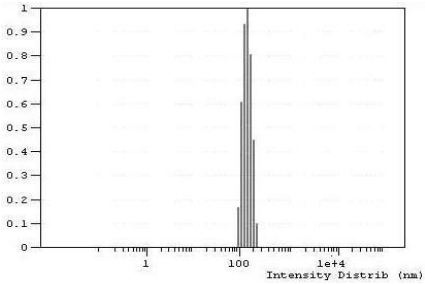


Рис. 1. Распределение по размерам нанокристаллов антрацена в водном растворе, полученное методом динамического рассеяния света

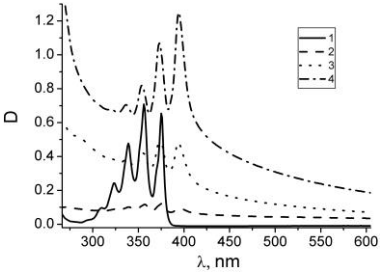


Рис. 2. Оптические спектры поглощения водных растворов нанокристаллов антрацена при увеличении их концентрации (2-4). 1- спектр антрацена в этаноле

Список литературы

1. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. // Химическая физика и мезоскопия. 2014. № 4. С. 574-587.

2. Кучеренко М.Г., Неясов П.П. // Химическая физика и мезоскопия. 2018. № 1. С. 33-48.

3. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. 2017. С. 1796-1802.

4. Пеньков С.А., Кучеренко М.Г. // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. 2019. С. 473-474.

5. Pen'kov S.A., Kucherenko M.G. // Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials Russian-Japanese Conference : proceedings. 2018. С. 44-46.

6. Кучеренко М.Г., Пеньков С.А. // Химическая физика и мезоскопия. 2019. № 2. С. 278-289.

7. Kasai H. et. al. // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. P. L1132-L1134.

8. Пеньков С.А. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры // Материалы Всерос. науч.-метод. конф. 2019. С. 2931-2934.

УДК 535(06)+004(06)

К.А. ГРИШУНИН, С.В. ОВЧАРЕНКО, В.Р. БИЛЫК
МИРЭА – Российский технологический университет

ТЕРАГЕРЦ-ИНДУЦИРОВАННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛЕ ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ

В работе исследуется поведение нелинейно-оптического отклика ИК импульса на частоте второй оптической гармоники при воздействии терагерцового импульса с пиковой амплитудой 1 МВ/см для различных взаимных направлений поляризаций оптического и терагерцового излучения. Результаты экспериментальных исследований были описаны в рамках модели электро-индуцированной второй оптической гармоникой.

K.A. GRISHUNIN, S.V. OVCHARENKO, V.R. BILYK
MIREA – Russian technological university

TERAHERTZ-INDUCED SECOND HARMONIC GENERATION IN STRONTIUM TITANATE CRYSTAL

In this work we investigated the nonlinear optical response at the second harmonic of IR pulse induced by terahertz pulse with 1MV/cm amplitude for different polarization directions of optical and THz waves. Experimental results were described with electric field induced second harmonic generation model.

За последние 20 лет благодаря бурному развитию относительно компактных и интенсивных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот, стало возможным непосредственное воздействия на колебания кристаллической решетки твердых тел, имеющие характерные частоты в тергерцовом диапазоне. В результате взаимодействия ТГц излучения с веществом была показана возможность воздействия на полярное состояние в сегнетоэлектриках [1, 2].

Титанат стронция ($SrTiO_3$) является одной из модельных сред со структурой перовскита при исследовании фундаментальных взаимодействий в физике конденсированного состояния. Являясь потенциальным сегнетоэлектриком, $SrTiO_3$ не претерпевает фазового перехода в полярное состояние вплоть до температур абсолютного нуля [3]. В тоже время приложение внешних сил, например, воздействия электрического поля [4] или механических напряжений [5], переводит структуру в полярное состояние.

В данной работе исследовалась возможность структурного фазового перехода в полярное состояние в кристалле титаната стронция под действием интенсивных терагерцовых импульсов с напряженностью электрического поля до 1 МВ/см. Исследование терагерц-индуцированных изменений проводилось при помощи нелинейно-оптического отклика методом генерации второй оптической гармоники (ВГ). Выбор методики детектирования обусловлен высокой чувствительностью к структурным изменениям, происходящим в кристаллической решетке исследуемого материала. Согласно электродипольному приближению, в объеме центросимметричного материала электрическая поляризация $P_{2\omega} = 0$ и, как следствие, генерация ВГ запрещена $I \sim P_{2\omega}$. Однако, приложение терагерцового поля E_{THz} вносит дополнительный член в разложение электрической поляризации P по степеням E в виде $P_{2\omega} \sim (\chi^{(3)} E_{THz} E_{\omega} E_{\omega})^2$, который зависит от величины поля терагерцовой волны. В эксперименте регистрировалось изменение интенсивности ВГ при вращении поляризации ТГц и оптических импульсов (рис. 1) для двух фиксированных направлений анализатора. На основе модели электро-индуцированной ВГ производились оценка терагерц-индуцированных структурных изменений и аппроксимация полученных результатов, в частности, были определены относительные значения ненулевых компонент тензора нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$.

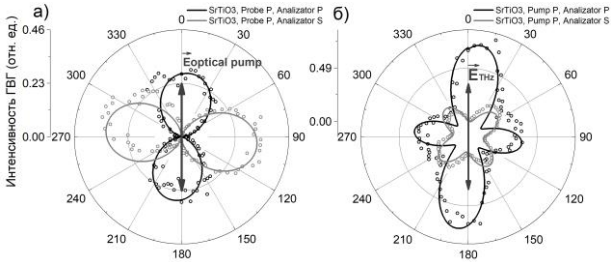


Рис. 1. Зависимости интенсивности ГВГ от угла поворота поляризации терагерцового (а), оптического импульса (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-32-00487).

Список литературы

1. Chen F. et. al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. № 18. P. 180104.
2. Mankowsky R. et. al. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. № 19. P. 197601.
3. Müller K.A., Burkard H. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. № 7. P. 3593-3602.
4. Tikhomirov O., Jiang H., Levy J. // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. № 14. P. 47601.
5. Khaber L., Beniaiche A., Hachemi A. // Solid State Commun. 2014. V. 189. P. 32-37.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ОВЧАРЕНКО, К.А. ГРИШУНИН, В.Р. БИЛЫК
МИРЭА – Российский технологический университет

ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ПОТЕНЦИАЛЬНОМ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ $SrTiO_3$, ИНДУЦИРОВАННАЯ ТЕРАГЕРЦОВЫМ ИМПУЛЬСОМ

В работе исследуется сверхбыстрая динамика нелинейно-оптического отклика в кристалле титаната стронция при возбуждении терагерцовым импульсом. Показано доминирование поглощения ТГц излучения на частотах выше 1.5 ТГц, обусловленое низколежащей мягкой фононной модой TO1.

S.V. OVCHARENKO, K.A. GRISHUNIN, V.R. BILYK
MIREA – Russian Technological University

NONLINEAR-OPTIC DYNAMICS INDUCED WITH TERAHERTZ PULSE IN INCIPIENT FERROELECTRIC $SrTiO_3$

The work investigates the ultrafast dynamics of the nonlinear optical response in a strontium titanate crystal pumped by a terahertz pulse. The dominant absorption of THz radiation at frequencies above 1.5 THz due to the low intensity of the TO1 background mode was shown.

Сегнетоэлектрические материалы со структурой перовскита образуют класс материалов, обладающим широким спектр свойств, такими как сверхпроводимость, пьезоэлектричество, сегнетоэлектричество и ферромагнетизм [1]. На основе этих свойств разрабатываются различные функциональные устройства, среди которых электромеханические и электрооптические модуляторы, сегнетоэлектрические энергонезависимые запоминающие устройства, радиочастотные фильтры и т.д. [2].

Титанат стронция является очень привлекателным для технологических и фундаментальных исследований как система, сочетающая структурную и сегнетоэлектрическую нестабильность [3]. Одним из требований, обуславливающих успешность применения материала в устройствах микро и наноэлектроники, является его быстродействие, т.е. скорость изменения его функциональных характеристик при приложении внешнего воздействия.

Целью работы являлось исследование сверхбыстрой динамики нелинейно-оптического отклика на частоте второй оптической гармоники (ВГ) в кристалле титаната стронция при воздействии электромагнитных импульсов терагерцового диапазона частот (рис. 1а). Наблюдается модуляция нелинейно-оптического отклика (рис. 1б) на временах порядка времени возбуждающего воздействия. Дальнейшая экспоненциальная динамика может быть описана на основе модели распространения электромагнитного излучения в объеме образца с учетом поглощения в терагерцовой области спектра, связанным, вероятней всего, с «хвостом» низкочастотной мягкой оптической моды, имеющей частоту $\omega = 2{,}7$ ТГц [4].

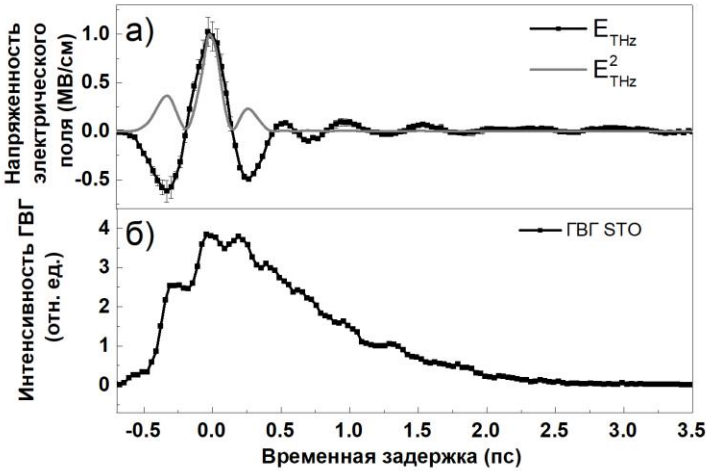


Рис. 1. Динамика интенсивности ВГ в кристалле титаната стронция (а), временной профиль напряженности электрического поля ТГц импульса (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-32-00487).

Список литературы

1. Рабе К.М., Ана Ч.Г., Трискона Ж.-М. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд. Москва: БИНОМ, 2015.
2. Watts B.E. // Process. Appl. Ceram. . 2009. V. 3. № 1-2. P. 97-101.
3. Han J. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. № 3. P. 031104.
4. Nilsen W.G. // J. Chem. Phys. 1968. V. 48, № 5. P. 2240-2248.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. СИДОРОВ[1,2], Н.В. ВАКУЛА[1], А.И. СИВАК[1]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

ЛИНЕЙНАЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Методами численного моделирования проведено исследование линейной поляризуемости металлических наночастиц вдали от плазмонного резонанса, в ближнем ИК диапазоне. Изучались наночастицы серебра, золота и меди, имеющие разную геометрию: сфера, сфера с диэлектрической оболочкой и эллипсоид вращения. Исследовано влияние материала и геометрии на поляризуемость наночастиц. Показана перспективность стекол с металлическими наночастицами в качестве электрооптических материалов.

A.I. SIDOROV[1,2], N.V. VAKULA[1], A.I. SIVAK[1]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

LINEAR POLARIZABILITY OF METAL NANOPARTICLES IN TELECOMMUNICATION WAVELENGTH SPECTRAL REGION

The study of linear polarizability of metal nanoparticles far from plasmon resonance, in near IR spectral region was performed by computer simulation. Silver, gold and copper nanoparticles were studied with different geometry: sphere, sphere with dielectric shell and ellipsoid. The influence of material and geometry on nanoparticles polarizability was studied. It is shown that the glasses with metal nanoparticles are promising as electrooptical materials.

Для управления оптическими сигналами широко используют электрооптические эффекты. Наиболее эффективными материалами для этих целей являются электрооптические кристаллы и стеклокерамики, однако эти материалы дороги и сложны в обработке. Стекла более технологичны и обладают малым светорассеянием. Из них могут быть изготовлены оптические волокна. В ряде работ (например, [1]) показано, что стекла с ионами тяжелых металлов также могут быть использованы в электрооптических устройствах, так как такие ионы обладают относительно высокой поляризуемостью. Значительно большей поляризуемостью обладают металлические наночастицы в области

плазмонного резонанса [2], которые могут быть синтезированы в оптических стеклах [3]. Но ограничивается возможность их применения в качестве электрооптических материалов из-за максимального сечения поглощения в области плазмонного резонанса. Целью настоящей работы было исследование методами численного моделирования поляризуемости и сечения поглощения металлических наночастиц в стекле вдали от плазмонного резонанса, а именно в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1 - 1.6 мкм, а также изучение их спектральных зависимостей.

Объектами исследования являлись наночастицы серебра, золота и меди, имеющие размер много меньше длины волны. Численное моделирование проводилось в дипольном квазистатическом приближении [2] с учетом дисперсии оптических констант металлов. Показатели преломления для стекла вокруг наночастицы – от 1.5 до 1.6, для наночастицы с оболочкой – 2.2 (AgCl). На рис. 1 показаны нормированные действительная и мнимая части поляризуемости δ сферической наночастицы серебра диаметром 10 нм с оболочкой из AgCl, толщиной 2 нм в стекле. Из рис. 1 видно, что действительная часть поляризуемости слабо зависит от длины волны излучения, в то время как у мнимой части поляризуемости есть существенная зависимость.

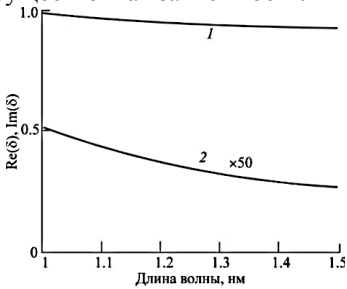


Рис. 1. Спектральные зависимости нормированных действительной (*1*) и мнимой (*2*) частей поляризуемости сферической наночастицы Ag (d = 10 нм) с оболочкой AgCl (h = 2 нм) в стекле

В работе проведено сравнение поляризуемостей наночастиц серебра, золота и меди, а также изучено влияние геометрии наночастиц на их поляризуемость. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых электрооптических стекол.

Список литературы

1. Jilkova K., Mika M., Kostka P. et. al. // J. Non-Cryst. Sol. 2019. V. 518. P. 51-56.
2. Kreibig U., Vollmer M. Optical properties of metal clusters. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
3. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. et. al. // Opt. Mater. 2014. V. 36. P. 753-759.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. ВАСИНА, Д.И. ХУСЯИНОВ, А.В. ГОРБАТОВА, А.М. БУРЯКОВ
МИРЭА – Российский технологический университет

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТОМ WSe_2

Приведены результаты экспериментов по генерации ТГц излучения в зависимости от угла поворота плоскости поляризации оптического возбуждения методом ТГц спектроскопии временного разрешения. Показано, что амплитуда генерируемого ТГц излучения имеет анизотропную зависимость от угла поворота плоскости поляризации оптического излучения возбуждения. Показано, что такая зависимость обусловлена эффектом поверхностного нелинейно-оптического выпрямления.

M.V. VASINA, D.I. KHUSYAINOV, A.D. GORBATOVA, A.M. BURYAKOV
MIREA – Russian Technological University

ROLE OF THE POLARIZATION ROTATION ANGLE OF OPTICAL EXCITATION ON THz GENERATION IN LAYERED WSe_2

The results of experiments on the generation of THz radiation depending on the angle of rotation of the plane of polarization of optical excitation by THz spectroscopy of time resolution are presented. It is shown that the amplitude of the generated THz radiation has an anisotropic dependence on the angle of rotation of the plane of polarization of the optical excitation. It is shown that this dependence is due to the effect of surface nonlinear optical rectification.

Возможность создания двумерных полупроводниковых материалов на основе слоистых дихалькогенидов переходных металлов привело к увеличению количества публикаций по теме низкоразмерной электроники и оптоэлектроники [1]. Также эти материалы привлекательны для использования в терагерцевой (ТГц) технологии. В работах [2, 3] была продемонстрирована генерация ТГц излучения в дихалькогенидах переходных металлов и показано, что механизм генерации ТГц излучения - это эффект нелинейно-оптического выпрямления.

Целью работы является исследование влияния плоскости поворота поляризации оптической лазерной накачки на генерацию ТГц излучения в

слоистом WSe_2 методом ТГц спектроскопии временного разрешения. Образец был выращен методом газотранспортной реакции. Его толщина составляла ~ 30 мкм и размеры 1 x 1 см. Исследования эмиссионных параметров генерации ТГц излучения проводились методом терагерцевой спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение. В качестве источника оптических фемтосекундных импульсов использовался лазер MaiTai Spectra-Physics с частотой следования в 80 МГц и длительностью импульсов в 100 фс с длиной волны 800 нм. Угол падения оптического излучения на образец был равен 45 º. Плотность энергии падающего на поверхность излучения составляла ~ 29 мкДж/см^2. Вращение плоскости поляризации оптической накачки обеспечивалось фазовой пластинкой λ/2. Для детектирования использовался метод нелинейно-оптической регистрации [4]. Аппроксимация проводилась используя нелинейно-оптическую теорию в работе [3].

Результат исследования представлен на рис. 1. Из рис. 1 видно, что при углах поворота плоскости поляризации оптического возбуждения от 0 до 360 º наблюдается синусоидальная зависимость амплитуды ТГц генерации. Такое поведение объясняется нелинейным оптическим эффектом поверхностного оптического выпрямления [3].

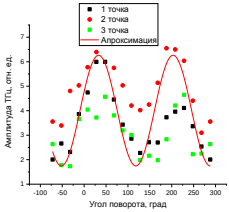


Рис. 1. Зависимость амплитуды генерируемого ТГц импульса от угла поворота поляризации оптической накачки

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-32-00886.

Список литературы

1. Kumar A., Ahluwalia P.K. Electronic structure of transition metal dichalcogenides monolayers 1H-MX2 (M = Mo, W; X = S, Se, Te) from ab-initio theory: new direct band gap semiconductors // Eur. Phys. J. B. 2012. V. 85. № 6. P. 186.

2. Zhang L. et. al. Terahertz surface emission of d-band electrons from a layered tungsten disulfide crystal by the surface field // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. № 15. P. 155202.

3. Si K. et. al. Terahertz surface emission from layered semiconductor WSe_2 // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 448. P. 416-423.

4. Kovalev S.P., Kitaeva G.K. Terahertz electro-optical detection: optical phase or energy measurements // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V. 30. № 10. P. 2650.

УДК 535(06)+004(06)

Д.Н. КОЧУРОВА, Н.И. АЛЕКСЕЕВ, А.И КАЛУГИН
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ

Выполнен обзор существующих моделей отражательной способности сложных объектов, применяющихся для моделирования машинного видения и компьютерной графики. Установлены их основные особенности и границы применимости. Для определения эмпирических параметров моделей разработана лазерная установка на основе пикосекундного лазера.

D.N. KOCHUROVA, N.I. ALEKSEEV, A.I. KALUGIN
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk

REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION OF COMPLEX OBJECTS

The review of the existing models of reflectance distribution function of complex objects used to simulate machine vision and computer graphics are performed. Their main features and limits of applicability are established. To determine the empirical parameters of the models a laser experimental device based on a picosecond laser are developed.

Знание отражательной способности различных объектов используется при 3D моделировании, в компьютерной графике, системах машинного зрения, при графическом рендеринге, в системах локационного назначения [1, 2]. Отражение от объекта является сложным процессом и зависит от характеристик поверхности объекта [3, 4]. Отражательная способность f содержит две компоненты, обусловленные зеркальным и диффузным отражением. Существует много моделей для описания отражательной способности объекта [1-4]. Почти во всех из них фигурируют подгоночные параметры, которые определяются экспериментально. В связи с этим, в настоящей работе была разработана лазерная установка на основе пикосекундного лазера для измерения отражательной способности реальных объектов.

Функцию распределения отражательной способности можно выразить как отношение яркости в направлении на приёмник к освещённости облучаемой области. В общем случае f зависит от направлений падающего и отраженного пучков.

Большинство моделей основано на том, что поверхность объекта заменяется множеством наклонных шероховатых плоскостей (микрограней). Модели функции распределения отражательной способности отличаются различными описаниями функций распределения наклонов граней, функций затенения и маскировки (через отношение незамаскированной/незатенённой части к длине микрограни [2] или через вероятности совместных событий отсутствия затенения и маскировки [4]). Просуммировав отражение от всех таких граней, получим общую отражательную способность.

Для проверки моделей функции распределения отражательной способности, а также получения новой информации о свойствах отраженного от реальных объектов пучка разработана лазерная импульсная установка, блок схема которой приведена на рис. 1. В качестве источника излучения используется пикосекундный лазер KATANA 15 [5]. Передающий объектив позволит изменять размер пятна на объекте для полного и частичного облучения. Объект располагается на поворотном столике.

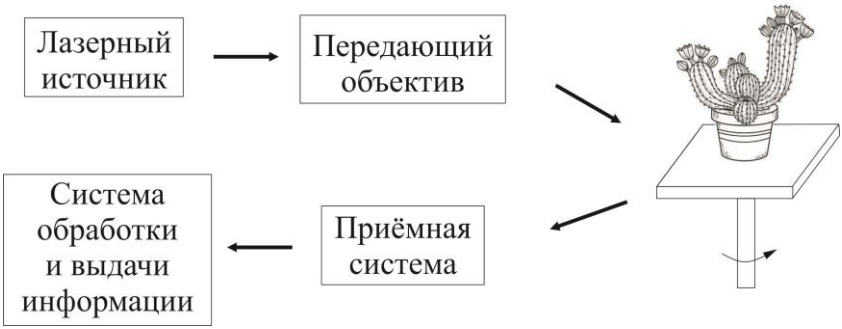


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Li D., Xu L. et. al. // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 111. P. 211-221.
2. Zhang H., Wang B. // Progress In Electromagnetics Research. 2018. V. 73. P. 17-24.
3. Carrea D., Abellan A. et. al. // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 113. P. 17-29.
4. Лабунец Л.В., Борзов А.Б., Ахметов И.М. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. С. 20-29.
5. Лазер KATANA 15 [Электронный ресурс] – режим доступа: https://sphotonics.ru/catalog/piko-i-nanosekundnye-lazery-ot-onefive/katana15hp/.

УДК 535(06)+004(06)

С.Ю. БАРЫШНИКОВА, Б.Н. КАРПИКОВ, А.И. КАЛУГИН[1], М.Р. ЗАРИПОВ[1]

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
[1]Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ОТРАЖЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Определено понятие эффективной площади отражения объекта. Предложена методика его измерения на основе сравнения с эталонным объектом. Разработана установка для экспериментального измерения эффективной площади отражения сложных объектов.

S.Yu. BARYSHNIKOVA, B.N. KARPIKOV, A.I. KALUGIN[1], M.R. ZARIPOV[1]

Kalashnikov Izhevsk State Technical University
[1]Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk

MEASURING THE EFFECTIVE AREA OF REFLECTION OF COMPLEX OBJECTS

The term of the effective area of reflection of object was determined. The method of its measuring was proposed, this method is based on comparing of reference object. The device for experimental measuring of the effective area of reflection of complex objects was developed.

Во многих задачах лазерного или оптического зондирования (например, дальнометрия, лазерное сканирование) возникает проблема определения мощности отраженного объектом излучения. В связи с этим следует ввести понятие эффективной площади отражения (ЭПО), которая является площадью некоторой плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны, которая, будучи помещена в точку нахождения объекта, отражает такую же мощность излучения, что и реальный объект. ЭПО имеет размерность площади, но не совпадает с площадью поверхности объекта. Она зависит от структуры объекта, шероховатости поверхности, отражательной способности [1]. В общем виде для ЭПО σ можно записать:

$$\sigma = \frac{1}{P_0} \int_S P(r, z) f_r(\theta_i, \theta_r) \cos\theta_i \cos\theta_r dS ,$$

где P_0 – амплитуда мощности, $P(r,z)$ – распределение мощности (r – расстояние от оси лазерного пучка, z – расстояние от лазера до объекта, измеренное вдоль направления распространения пучка), $f_r(\theta_i,\theta_r)$ – отражательная способность объекта [2], θ_i – угол падения лазерного пучка на объект, θ_r – угол отражения лазерного пучка от объекта.

Практически вычисление ЭПО вызывает ряд трудностей, связанных с отсутствием точных моделей отражательной способности реальных объектов и сложностей описания пространственного распределения мощности реального лазерного пучка, распространяющегося в атмосфере. Поэтому необходимы экспериментальные исследования ЭПО. Нами разработана методика измерения ЭПО на основе сравнения с эталонным объектом. В качестве эталонной поверхности будем использовать плоское зеркало. Его ЭПО $\sigma_э$ примерно равно:

$$\sigma_э = S \cdot R,$$

где S – площадь зеркала, R – коэффициент отражения зеркала.

Мощность излучения, поступающая на приемную систему после отражения от эталонного зеркала, $P_э$ равна:

$$P_э = \frac{P_и}{S_2}\frac{S_п}{S_1}\sigma_э,$$

где $P_и$ – мощность излучения лазера, S_1 – площадь пучка в плоскости входной апертуры приемной системы, S_2 – площадь пучка в плоскости эталонного зеркала, $S_п$ – площадь входной апертуры приёмной системы.

Мощность излучения, поступающая на приемную систему после отражения от объекта $P_{об}$:

$$P_{об} = \frac{P_и}{S_2}\frac{S_п}{S_1}\sigma.$$

Из отношения мощностей, созданных объектом и эталонным зеркалом, можно получить, что ЭПО объекта:

$$\sigma = \frac{P_{об}\sigma_э}{P_э}.$$

В настоящей работе на основе изложенной методики разработана установка для измерения ЭПО сложных объектов. Результаты измерений предполагается применить для построения более точной модели процессов отражения лазерного сигнала от реальных объектов.

Список литературы

1. Zhang H., Wang B. // Progress In Electromagnetic Research M. 2018. V. 73. P. 17-24.

2. Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsgerb I.W., Limperis T. // National Bureau of Standarts, U.S. Department of Commerce. 1977.

УДК 535(06)+004(06)

И.М. ПЛЕШАНОВ[1], А.Е. ЛИСЕНКОВА[2], В.П. ЦЕПИЧ[2],
А.И. СИДОРОВ[1,2]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ДАТЧИКЕ ИСКРЫ

В работе представлены схемы позиционно-чувствительного датчика искры. На программном обеспечении Optic Studio Zemax 17 были смоделированы различные варианты оптических схем, которые можно применить для датчика искры. По результатам моделирования оптические системы и телескопы являются наиболее подходящим решением для применения в позиционно – чувствительном датчике искры.

I.M. PLESHANOV[1], A.E. LISENKOVA[2], V.P. TSEPICH[2],
A.I. SIDOROV[1,2]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

FEMSIMULATION OF THE OPTICAL SYSTEM FOR APPLICATION IN THE POSITION-SENSITIVE SPARK SENSOR

The paper presents a diagram of a position-sensitive spark sensor. Using OpticStudioZemax 17 software, various optical schemes have been simulated that can be applied to create spark sensor. According to the simulation results, optical systems and telescopes are the most suitable solution for use in a position-sensitive spark sensor.

Зачастую причиной многих возгораний как на предприятиях, так и повседневной жизни человека, служит электрического разряд. Причинами возникновения искр могут быть: искрение электропроводки электрических контактов, появления искр в результате трения и ударов механических деталей, короткое замыкание и т.д. Существует множество способов детектирования искры, основанные на контроле параметров и характеристик электрической цепи с коротким замыканием или на характеристиках самого электрического разряда и сопутствующих ему явлениях (температуре, давлении, степени ионизации газов) имеют

невысокую селективность и недостаточное быстродействие, либо низкую надежность. В качестве датчиков искры зачастую используют фотодетекторы, однако активные элементы данных датчиков расположены в местах, где присутствует сильное электромагнитное излучение, создающие помехи. Данные датчики не стабильны и зачастую дают ложные срабатывания и быстро выходят из строя.

Представленный позиционно-чувствительный датчик искрения включает в себя: оптическую схему, ультрафиолетовый фильтр, люминесцентное стекло, матрицу, оптическое волокно и кремниевый фотодиод. Оптическая схема и ультрафиолетовый фильтр служат для фильтрации и фокусировки излучения искры на люминесцентное стекло [1, 2]. Люминесцентное стекло служит для преобразования ультрафиолетового излучения в такую область спектра, которую максимально зарегистрирует кремниевый фотодиод. Для того чтобы отнести фотодиод на максимальное расстояние от электромагнитного фона, в данной конструкции применяются оптические волокна. Особенностью нашей конструкции является то, что материалы, используемые в данном позиционно-чувствительном датчике искрения невосприимчивы к электромагнитным помехам.

С помощью программного обеспечения Optic Studio Zemax 17 было произведено моделирование оптических систем с учетом сферической аберрации и астигматизма, были подобраны оптимальные решения для применения в позиционно – чувствительном датчике искрения. По результатам моделирования мы пришли к выводу, что оптические системы, состоящие из 2 - 4 линз и телескопы, состоящие из зеркал, являются наиболее подходящими. Их преимуществами являются регулирование фокусного расстояния, минимальные потери излучения и размеры пятна рассеивания. Также малые фокусные расстояния оптических систем способствуют компактности датчика.

Список литературы

1. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // Optical Materials. 2014. V. 36. № 4. P. 753-759.

2. Плешанов И.М., Белорус А.О., Агафонова Д.С. Исследование чувствительных элементов на основе оксифторидных стекол с молекулярными кластерами серебра // Научные исследования и разработки. 2015. Р. 55-58.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. САМВЕЛОВ, С.Г. ЯСЕВ, А.С. МОСКАЛЕНКО,
А.Ю. БАРАНОВ[1], О.В. ПАХОМОВ[1]
АО «ОКБ «АСТРОН», Лыткарино
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА СТИРЛИНГА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ФОТОПРИЕМНОГО МОДУЛЯ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ РЕГЕНЕРАТОРОМ И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОЙ СТУПЕНЬЮ ОХЛАЖДЕНИЯ

Разработана двухступенчатая микрокриогенная система (МКС) Стирлинга для криостатирования матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) с редкоземельным регенератором в первой ступени охлаждения и магнитокалорическим охлаждением во второй ступени. Детандер МКС имеет встроенный активный регенеративный теплообменник. МКС обеспечивает расширенный интервал температур криостатирования и имеет повышенный КПД вблизи температуры охлаждения 80 К.

A.V.SAMVELOV, S.G. YASEV, A.S. MOSKALENKO,
A.Yu. BARANOV[1], O.V. PAKHOMOV[1]
JSC «Opto-mechanical Design Office «ASTRON», Lytkarino
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

MICROCRYOGENIC STIRLING SYSTEM FOR PHOTODETECTOR COOLING WITH RARE-EARTH REGENERATOR AND MAGNETOCALORIC COOLING STAGE

A two-stage Stirling microcryogenic system (MCS) for cryostatting a matrix photodetector device with a rare-earth regenerator in the first stage of cooling and a second-stage magnetocaloric cooling was developed. The MCS expander has a built-in active regenerative heat exchanger. The system provides an extended cryostat temperature range and is characterized by an increased efficiency near the cooling temperature of 80 K.

Микрокриогенная система предназначена для охлаждения матричного фотоприёмного модуля. Низкотемпературная ступень работает на основе магнитокалорического эффекта, и включает комбинированный регенератор с областью насадки в «холодной» зоне из гольмия, «тёплая» зона насадки заполнена сетчатыми элементами из стали 12Х18Н10Т [1].

Разработанная МКС Стирлинга имеет в первой ступени охлаждения активный магнитный регенератор на основе гольмия, во второй ступени охлаждения – магнитокалорический охладитель и неподвижные постоянные магниты (рис. 1). Система обладает пониженным энергопотреблением и расширенным интервалом рабочих температур при повышенном КПД вблизи температуры 80 К [2-4]. В отличие от известных МКС Стирлинга появляется дополнительная ступень охлаждения криоагента, работающая на магнитокалорическом эффекте, приводящая к росту КПД и расширению рабочего диапазона температур.

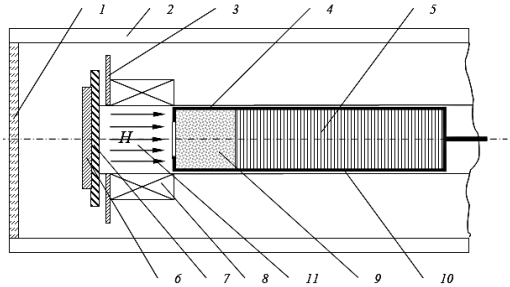


Рис. 1. Охладитель МКС Стирлинга с магнитокалорической ступенью охлаждения

Изотермическое расширение выполняется детандером (10), изохорное охлаждение осуществляется в высокоэффективном комбинированном регенераторе. Вторая ступень – магнитокалорическая, включает гольмиевую зону регенератора (9) и кольцевой магнитный элемент (8). Работа второй ступени реализуется магнитокалорическим эффектом при извлечении гольмиевой зоны регенератора из магнитного поля [5-6].

Таким образом, после окончательного охлаждения криоагент обеспечивает температуру криостатирования до 60 К при снижении потребляемой мощности на 12-15 % и повышении КПД на 8-10 %.

Список литературы

1. Аракелов Г.А., Самвелов А.В. // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 78-84.

2. Еремчук А.И., Самвелов А.В., Сысоев Д.А., Широков Д.А., Оганесян Н.Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 224-226.

3. Колесников А.М., Самвелов А.В., Словеснов К.В. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 80-82.

4. Трошкин Ю.С., Чапкевич А.Л., Горбунов Е.К., Посевин О.П., Самвелов А.В. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 60-65.

5. Суслов А.Д. Криогенные газовые машины. М.: Машиностроение, 1982.

6. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Молочкова О.С. Материаловедение. Магнитогорск, 2014.

УДК 535(06)+004(06)

О.Э. БАБКИН, Л.А. БАБКИНА[1], О.С. АЙКАШЕВА[2], В.В. ИЛЬИНА
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
[1]ООО «S@H Technology», Санкт-Петербург
[2]Компания «PPG Industries», Амстердам, Нидерланды

ТЕХНОЛОГИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

В работе представлены результаты разработки в области производства оптического волокна. Представлены составы УФ-полимеризующихся композиций для получения двухслойных защитный покрытий кварцевых световодов технологией «мокрый по мокрому».

O.E. BABKIN, L.A. BABKINA[1], O.S. AYKASHEVA[2], V.V. IL'INA
Saint-Petersburg State University of Film and Television
[1]S@H Technology Ltd., Saint-Petersburg
[2]PPG Industries, Amsterdam, The Netherlands

UV CURING TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF OPTIC CABLES

The paper presents the results of the development in the field of optical fiber production. Present UV-polymerizable compositions are developed for the preparation of two-layer protective coatings on quartz optical fibers by «wet-on-wet» technology.

Одним из ведущих производителей оптических кабелей в Российской Федерации является ЗАО «Оптиковолоконные Системы» (г. Саранск). Технология производства заключается в вытягивании световода кварцевого стекла, нанесении защитных покрытий и цветовым кодировании волокна. Защитное покрытие наносят по двухслойной технологии «мокрый по мокрому» при скорости промышленной линии 1500 - 1700 м/мин. и при температуре 50 °С.

Технологически, двухслойное защитное покрытие световода создается с использованием двух жидких фотополимеризующихся (УФ-полимеризующихся) композиций, отличающихся рецептурным составом, подбор ингредиентов которых производится исходя из требуемых эксплуатационных характеристик слоев покрытия [1, 2]. К нижнему (грунтовочному) слою предъявляются требования по адгезии к кварцевому стеклу, к тому же он обеспечивает эластичность покрытия. Верхний (лаковый) слой должен в первую очередь обеспечивать

прочность покрытия и его стойкость к истиранию. Цветовая кодировка (до 17 цветов) обеспечивается нанесением дополнительного слоя на сформированное защитное покрытие.

Авторами разработаны рецептуры композиций на основе уретанакрилатов для обоих слоев покрытия, проведены исследования их механических характеристик методом динамического механического анализа (ДМА) и сделаны выводы о влиянии на рабочий интервал температур ингредиентного состава композиций. Предложены варьируемые составы композиций с сополимеризующимися мономерами с собственными низкими температурами стеклования (для нижнего слоя) и высокими температурами стеклования (для верхнего слоя) [3]. В работе исследованы рецептуры композиций на основе алифатического уретанового акрилата в смеси с сополимеризующимися мономерами, с добавкой промоутера адезии – двухфункциональной адгезионнойсмолы и фотоинициатором 2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфиноксид.

На рис. 1 приведена микрофотография среза оптического волокна, полученная на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 SBH в инжиниринговом центре СПбГТИ (ТУ), на фотографии различимы два слоя защитного покрытия световода и отмечены их толщины.

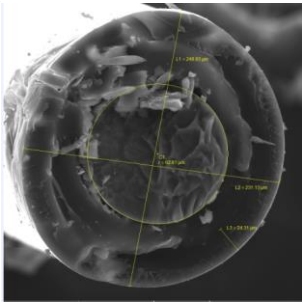


Рис. 1. Микрофотография среда оптического волокна, полученного по технологии двухслойного покрытия кварцевого световода УФ-полимеризующимися композициями

Список литературы

1. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В. Особенности технологии нанесения УФ-отверждаемых композиций на оптическое волокно // Лакокрасочные материалы и их применение. 2017. № 12. С. 12-15.

2. Babkin O.E., Il’ina V.V., Babkina L.A., Sirotinina M.V. UV-Cured coatings for functional protection // Russian journal of Applied Chemistry. 2016. V. 89. № 1. P. 114-119.

3. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В. Принципы составления рецептур, определяющих свойства фотополимерных покрытий и изделий // Известия СПбГТИ (ТУ). 2019. № 48 (74). С. 63-67.

УДК 535(06)+004(06)

М.М. МАНДУР[1], С.А. АСТАШКЕВИЧ[1], А.А. КУДРЯВЦЕВ[1,2]
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет*
[2]*Харбинский технологический институт, Китай*

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ДВУХКАМЕРНОЙ ФОТОПЛАЗМЕННОЙ ЯЧЕЙКИ: 2D-СИМУЛЯЦИЯ

Представлены результаты оптимизации параметров фотоэлектрического преобразователя на основе фотоплазмы газовой смеси Na–Ar в двухкамерной ячейке: размера второй камеры и давления буферного газа.

M.M. MANDOUR[1], S.A. ASTASHKEVICH[1], A.A. KUDRYAVTSEV[1,2]
[1]*Saint-Petersburg State University*
[2]*Harbin Institute of Technology, China*

A PHOTOELECTRIC CONVERTER BASED ON A TWO-CHAMBER PHOTOPLASMA CELL: 2D SIMULATION

This study presents the results of optimization of some design parameters of a photoelectric converter on the basis of a two-chamber Na–Ar gas mixture photoplasma including the size of the second chamber and the buffer gas pressure.

Фотоплазма в газовой смеси Na–Ar может быть создана путем частичной ионизации паров Na лазерным или не лазерным резонансным излучением [1]. Сначала возбужденные атомы Na(3p) образуются в результате поглощения резонансного излучения (оптическая накачка). Затем столкновение этих возбужденных атомов приводит к образованию более высоковозбужденных атомов Na(5s/4d) и, как следствие, к их ионизации с образованием Na^+ (пеннинговская ионизация) и Na_2^+ (ассоциативная ионизация). Наконец, высвобожденные электроны в процессе ионизации взаимодействуют с нормальными и возбужденными атомами Na, что приводит к образованию плазмы и процессам переноса заряда [1, 2]. При этом важную роль играет процесс переноса излучения.

Экспериментальное исследование фотоплазмы в парах цезия, созданной концентрированной линзой солнечным излучением было выполнено в [3]. Метод двумерного моделирования фотоплазмы был разработан и испытан на примере смеси Na–Ar в двухкамерной ячейке [2].

Двухкамерная конфигурация плазменной ячейки (рис. 1) используется для того, чтобы сфокусировать резонансное излучение в первой камере и,

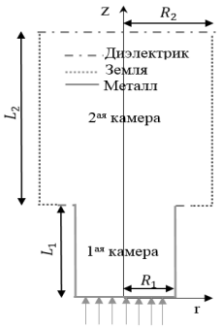


Рис. 1. Геометрия двухкамерной ячейки

благодаря диффузии и расширению плазмы во вторую камеру, получить градиент электронной плотности и электрического потенциала. Цель настоящей работы состоит в демонстрации способности получения ЭДС (разности потенциалов между двумя камерами (рис. 1)) в двухкамерной ячейке под действием резонансного излучения и оптимизации ее параметров: размера второй камеры и давления буферного газа.

Используя COMSOL Multiphysics Plasma Module, проведена 2D-симуляция цилиндрической двухкамерной ячейки (см. рис. 1) со смесью Na и Ar (P_{Ar} = 0.1 - 10 Торр и P_{Na} = 0.02 Торр при T_g = 580 K) с (R_2 = 0.5 - 3 см; L_2 = 1 - 4 см) при фиксированном размере первой камеры (R_1 = 0.5 см; L_1 = 1 см) при однородном пространственном распределении скорости резонансного возбуждения 5×10^{22} м$^{-3}$с$^{-1}$ в первой камере. Получены зависимости электронной плотности, электронной температуры и ЭДС от размера второй камеры (рис. 2) и давления буферного газа (рис. 3). Наибольшее значение ЭДС 1.61 В получено для $R_2 = L_2 = 2$ см и P_{Ar} = 5 Торр. Полученные результаты открывают возможность для проектирования фотоэлектрического преобразователя на основе двухкамерной фотоплазмы и его экспериментального исследования.

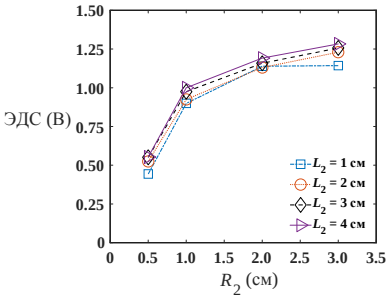


Рис. 2. ЭДС при разных значениях длины L_2 при разных радиусах R_2 при P_{Ar} = 1 Торр

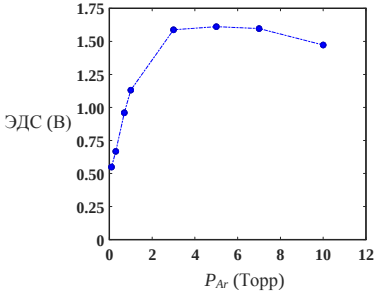


Рис. 3. ЭДС при разных давлениях буферного газа P_{Ar} для $R_2 = L_2$ = 2 см

Список литературы

1. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 10. P. 103509.
2. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. № 1.
3. Dunning G.J., Palmer A.J. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 12. P. 7086.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Е. СЕМЕНОВА
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА ПРИ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА С НИЖНИМ ЭКСИТОННЫМ УРОВНЕМ В КРИСТАЛЛЕ CdS

Рассмотрены процессы гиперкомбинационного рассеяния света на LO-фононах в кристалле CdS при двухфотонном возбуждении вблизи нижнего экситонного уровня.

L.E. SEMENOVA
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

HYPER-RAMAN SCATTERING OF LIGHT UNDER TWO-PHOTON EXCITATION NEAR RESONANCE WITH THE LOWEST EXCITONIC LEVEL IN A CdS CRYSTAL

Processes of the hyper-Raman scattering of light by LO-phonons in a CdS crystal under two-photon excitation near the lowest excitonic level are considered.

Экспериментальному исследованию гиперкомбинационного рассеяния (ГКР) света в CdS посвящено несколько публикаций [1-3]. В частности, сообщалось о наблюдении заметного увеличения интенсивности ГКР на LO-фононах при приближении удвоенной энергии кванта возбуждающего излучения к области экситонных резонансов [3], которое в работе [4] объяснялось механизмом рассеяния, включающим двухфотонные переходы в экситоны *s*-типа. Позже было показано [5], что при геометрии рассеяния, используемой в эксперименте [3], возможен процесс ГКР, которому соответствует следующая последовательность переходов: двухфотонный дипольный переход в *s*-экситон серии A, переход в *p*-экситон в результате внутризонного фрелиховского экситон-фононного взаимодействия и слабо-запрещенный дипольный переход в основное состояние. Матричный элемент этого дипольного перехода имеет вид [6]

$$\Pi_{0\Lambda} = \varepsilon_\alpha \sum_{j_c, j_v} M_{j_c j_v}^{\alpha' \alpha *} \hat{p}_{\alpha'} \chi_{j_c j_v}^{\lambda} (\vec{r}) \Big|_{r=0} , \qquad (1)$$

где $\hat{p}_\alpha = -i\hbar\,\partial/\partial r_\alpha$, ε – поляризация излучения, $\chi^{\lambda}_{j_c j_v}(\vec{r})$ – волновая функция относительного электронно-дырочного движения, параметр $M^{\alpha'\alpha}_{j_c j_v}$ определен в работе [6]. Но зависимость вклада этого процесса в ГКР от направлений поляризации возбуждающего излучения и рассеянного света такая же, как и для последовательности промежуточных экситонных состояний *s*-*p*-*s* [5].

Процесс ГКР, которому соответствует последовательность *s*-*p*-*s*, описывается в рамках двухзонной модели и включает только дипольно-разрешенные переходы и, следовательно, вносит основной вклад в сечение рассеяния. Были выполнены оценки частотной зависимости сечения ГКР света на LO-фононах для кристалла CdS с учетом вкладов механизма рассеяния, включающего двухфотонные дипольные переходы в *s*-экситоны серии А, и последовательности промежуточных экситонных состояний *s*-*p*-*s*, относящихся к серии А. Расчеты, выполненные для силы осциллятора дипольного перехода на экситонный уровень $A_{n=1}$ $f_{An=1} = 0.0014$ [7], показали, что при $\left|M^{xx}_{cv}\right|^2 \le 1$ рост сечения рассеяния при приближении к двухфотонному резонансу не соответствует наблюдаемому ранее в эксперименте [3].

Правила отбора разрешают дипольный переход между подзоной А и подзонами В и С. Поскольку в данной работе рассматриваются волновые функции валентной зоны, полученные в работе [8], соответствующие матричные элементы могут оказаться ненулевыми, в частности, вследствие подмешивания *d*-подобных волновых функций, преобразующихся по неприводимому представлению Γ_6, к *p*-подобным (Γ_5) в подзоне А. Но тогда возможны и переходы между *s*-экситонами, относящимся к разным сериям, в результате фрелиховского экситон-фононного взаимодействия. Это ведет к дополнительным процессам ГКР.

Список литературы

1. Поливанов Ю.Н., Саяхов Р.Ш. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30 (9). С. 617.
2. Inoue K., Minami F. et. al. // J. Cryst. Growth. 1992. V. 117. P. 738.
3. Maslov V.A., Ondriash K.K. et. al. // Las. Phys. 1996. V. 6. P. 132.
4. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // Las. Phys. Lett. 2004. V. 1. P. 253.
5. Семенова Л.Е. Гиперкомбинационное рассеяние света на LO-фононах при двухфотонном возбуждении вблизи края поглощения в кристалле CdS // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 519-520.
6. Denisov M.M., Makarov V.P. // Phys. Stat. Sol. (b). 1973. V. 56. P. 9.
7. Соболев В.В. Зоны и экситоны соединений группы $A^{II}B^{IV}$. Кишинев: Штиинца, 1980.
8. Gutsche E., Jahne E. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 19. P. 823.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. МИТЮРЕВА, В.В. СМИРНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

СТУПЕНЧАТОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ УРОВНЕЙ 5p АТОМА КРИПТОНА

Представлены данные для сечений возбуждения электронным ударом уровней $4p^5 5p$ атома криптона из метастабильных состояний $4p^5 5s\ ^3P_{0,2}$. Они отражают совокупный результат из имеющихся данных по указанному процессу, включая результаты собственных измерений авторов.

A.A. MITYUREVA, V.V. SMIRNOV
Saint-Petersburg State University

STEP BY STEP ELECTRON IMPACT EXCITATION OF 5p LEVELS OF KRYPTON ATOM

There are represented the data for electron impact excitation cross sections of $4p^5 5p$ levels of the krypton atom from the metastable states $4p^5 5s\ 3P_{0,2}$. They reflect the totality of the available data on the specified process, including the results of authors own measurements.

Сечения возбуждения электронным ударом важны для описания процессов, происходящих в различных средах, в том числе приводящих к излучению. По данному вопросу накоплен большой материал и возникает потребность извлечения конкретного результата из всего этого массива. Для этого нами разработана методика получения сечения, в которой используется информация из имеющихся данных по указанному процессу, включая результаты собственных измерений [1, 2]. Сечения находятся на основе регрессионного анализа по имеющимся данным с заданной параметрической функцией регрессии. Используется аппроксимация сечения возбуждения электронным ударом в виде

$$\sigma(E) = p_0 \left(\frac{u}{u+1} \right)^{p_1} (u + p_2)^{-p_3}, \quad u = \frac{E}{\Delta E} - 1,$$

где E – энергия электронов, ΔE – порог возбуждения, $p = (p_0, p_1, p_2, p_3,)$ – параметры.

В табл. 1 приведены полученные значения параметров регрессии и относительная выборочная дисперсия результата D для уровней $2p_2$ и $2p_6$ (в обозначениях Пашена) электронной конфигурации $4p^5 5p$ атома криптона из метастабильного состояния $4p^5 5s\ ^3P_2$ (уровень $1s_5$ в обозначениях Пашена). На рис. 1 и 2 соответствующие сечения представлены в графическом виде: Q (10^{-16} cm^2), E (eV).

Таблица 1. Значения параметров

up level	D	p_0 10^{-16} cm^2	p_1	p_2	p_3
$2p_2$	1.07	7.49	0.409	2.169	2.02
$2p_6$	0.75	266	1.258	5.05	0.93

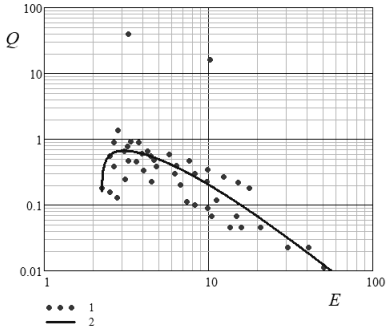


Рис. 1. Сечение уровня $2p_2$

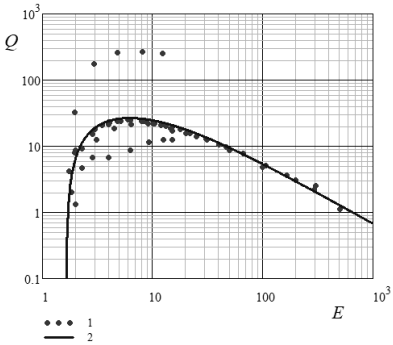


Рис. 2. Сечение уровня $2p_6$

Список литературы

1. Митюрева А.А., Смирнов В.В. // Научно-техн. ведомости СПбГПУ, Физ.-Мат. Науки. 2015. Вып. 4 (230). С. 48-60.

2. Митюрева А.А., Пенкин Н.П., Смирнов В.В. // Опт. и спектр. 1989. Т. 67. № 4. С. 785-787.

УДК 535(06)+004(06)

В.М. НАЛБАНДЯН, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ НА РАДИАЦИОННЫЕ И БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МОЛЕКУЛАХ

Исследованы электрон-фотонные процессы в трёхчастичном кластере, образованном сферической металлической наночастицей (НЧ) и молекулярной донор-акцепторной парой. Установлено влияние наночастицы на скорость спонтанных переходов в донорной молекуле и межмолекулярный безызлучательный перенос энергии. Показано, каким образом данные процессы зависят от геометрических и спектральных параметров компонентов системы.

V.M. NALBANDYAN, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

EFFECT OF PLASMON NANOPARTICLES ON RADIATIVE AND NONRADIACTIVE PROCESSES IN MOLECULES

Electron-photon processes in a three-particle cluster formed from a spherical metal nanoparticle (NP) and a molecular donor-acceptor pair was investigated. The influence of nanoparticles on the rate of spontaneous transitions in donor molecules and on intermolecular nonradiative energy transfer was established. It is shown that these processes depend on the geometric and spectral parameters of the system.

В работе [1] экспериментально исследован ферстеровский резонансный плазмон-усиленный перенос энергии в донорно-акцепторных парах молекул, расположенных вблизи островковой пленки серебра. Применительно к результатам данной работы нами предложена математическая модель, учитывающая все конкурирующие каналы распада электронновозбужденного состояния молекулы донора.

Для скорости $w_{sp}(\omega\,|\,r)$ спонтанной эмиссии донорной молекулы, расположенной вблизи наночастицы на расстоянии r от ее центра, было использовано следующее выражение [2]

$$w_{sp}(\omega\,|\,\mathbf{r}) = \frac{4}{3}\frac{\omega^3}{\hbar c^3}\left|\left[\overleftrightarrow{\mathbf{I}} + \alpha(\omega)\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\right]\mathbf{p}_D\right|^2, \qquad (1)$$

где $\alpha(\omega)$ – дипольная поляризуемость наночастицы; $\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r})$ – тензорная функция Грина квазистатического поля дипольного источника;

$\mathbf{p}_D$ – вектор электронного дипольного момента перехода в молекуле донора. На основе (1) был выполнен расчет спектров скорости радиационного распада донора, а также зависимости этой скорости от расстояния между молекулой-донором и наночастицей (рис. 1).

Расчет скорости безызлучательного переноса энергии на молекулу акцептора с дипольным моментом перехода $\mathbf{p}_A$, расположенную в точке $\mathbf{r}_A$, проведен по формуле [3]

$$U_{DA}(\omega\,|\,\mathbf{r}_{DA},\mathbf{r}_D,\mathbf{r}_A) \sim \left\{\mathbf{p}_D\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_{DA})\mathbf{p}_A + \left[\mathbf{p}_D\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_D)\alpha(\omega)\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_A)\mathbf{p}_A\right]\right\}^2. \qquad (2)$$

Был произведен учет и безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения от молекулы донора (спектр $G_D(\omega)$) на плазмонные моды наночастицы (рис. 2) с последующим затуханием этих мод со скоростью:

$$U_{dis}(\omega) = (2\hbar)^{-1}\frac{4}{3}\pi\,\mathrm{Im}\left[\mathbf{p}_D\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\alpha(\omega)\overleftrightarrow{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\mathbf{p}_D\right]G_D(\omega)\,. \qquad (3)$$

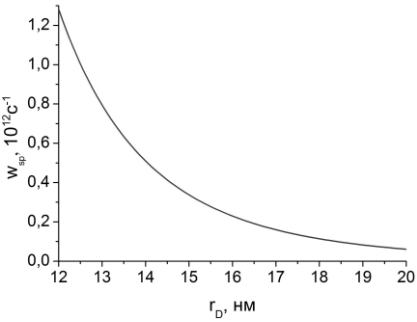


Рис. 1. Дистанционная зависимость скорости спонтанной эмиссии донора вблизи НЧ на резонансной частоте $\omega = 8\times10^{15}\,\mathrm{c}^{-1}$

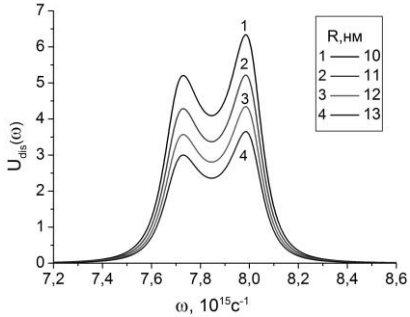


Рис. 2. Спектры скорости безызлучательного переноса энергии возбуждения от молекулы донора на НЧ при увеличении радиуса НЧ, $\omega_{pl} = 13.87\cdot10^{15}\,\mathrm{c}^{-1}$, $r_D = R + 2\,\text{нм}$

Список литературы

1. Ibrayev N., Seliverstova E., Zhumabay N., Temirbayeva D. // J. of Lumines. 2019. V. 214. P. 116594.

2. Кучеренко М.Г., Русинов А.П., Налбандян В.М. // Матер. Межд. конфер. «Наука и образование: фундамент. основы, технологии, инновации». 2015. Ч. 4. С. 167-173.

3. Кучеренко М.Г., Степанов В.Н., Кручинин Н.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 1. С. 107-114.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ, О.Б. СУХОРУКОВА

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЯНИИ ФОТОНА АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказана лидирующая роль эффекта тормозного излучения при резонансном комптоновском рассеянии жесткого рентгеновского фотона многозарядным атомным ионом. Этот результат может оказаться важным, в частности, при интерпретации $K\alpha, \beta$–спектров эмиссии от горячих астрофизических объектов.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV, O.B. SUKHORUKOVA

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

BRAKING RADIATION AT RESONANT COMPTON SCATTERING A PHOTON BY AN ATOMIC ION

The leading role of the bremsstrahlung effect is theoretically predicted for resonant Compton scattering of a hard X-ray photon by a multicharged atomic ion. This result may be important, in particular, in the interpretation of $K\alpha, \beta$–emission spectra from hot astrophysical objects.

Мы конкретизируем формально математически полный нерелятивистский вариант квантовой теории процесса резонансного комптоновского рассеяния фотона многоэлектронной системой [1] на случай учёта амплитуды вероятности тормозного излучения в жёстком рентгеновском диапазоне конечных состояний рассеяния. В качестве объекта исследования взят неоноподобный атом аргона (Ar^{8+}).

Исследован процесс $\hbar\omega + [0] \to Q \to 2p_j^5 \varepsilon p + \hbar\omega_C$, где $\hbar\omega\,(\hbar\omega_C)$ – энергия падающего (рассеянного) фотона, $[0]$ – основное состояние иона, Q – промежуточные (виртуальные) состояния рассеяния и j = 1/2, 3/2. Результаты расчёта дифференциального сечения рассеяния, $\sigma_\perp^{(1)} \equiv d\sigma_\perp / d(\hbar\omega_C)$ (символ «⊥» – векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния), представлены на рис. 1. При

$\hbar\omega \in (17.5;\ 25)$ кэВ амплитуда вероятности рассеяния через состояния $Q = 2p_j^5 x(s,d)$ доминирует над амплитудой вероятности рассеяния через состояния $Q = 1sxp$. Как результат, эффект тормозного излучения (переход между состояниями сплошного спектра $x(s,d) \to \varepsilon p + \hbar\omega_C$) доминирует над эффектом рентгеновской $K\alpha_{1,2}$–эмиссии (переход между оболочками остова иона $1s \to 2p_j + \hbar\omega_C$).

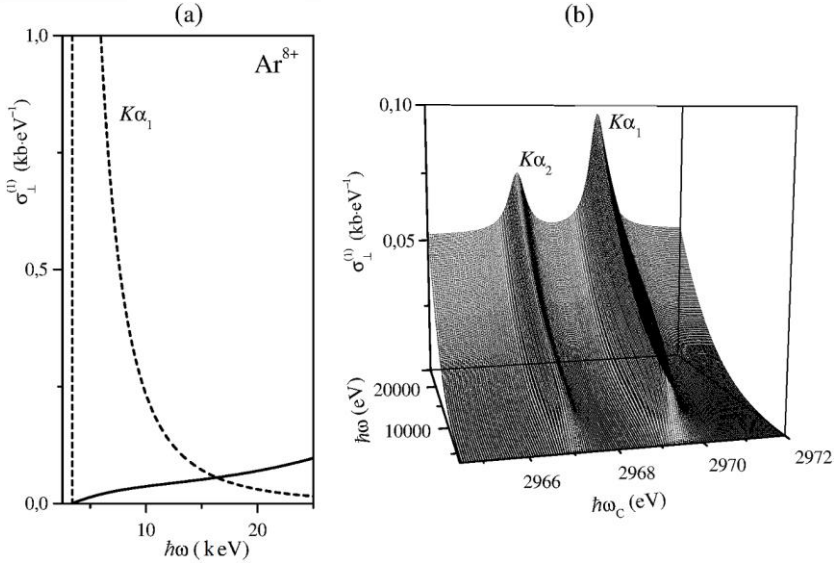


Рис. 1. Дифференциальное сечение резонансного комптоновского рассеяния фотона ионом Ar^{8+}: $\hbar\omega_C$ = 2969.42 эВ, штриховая кривая – учтена лишь амплитуда вероятности эмиссии, сплошная – учтены лишь амплитуда вероятности тормозного излучения и её интерференция с амплитудой вероятности эмиссии (a); эволюция сплошной кривой рис. 1a на интервале $\hbar\omega_C \in (2965;\ 2972)$ эВ (b), энергии порогов ионизации (в эВ): I_{1s} = 3393.56 (релятивистский расчет данной работы), I_{2p_j} = 426.51 (j = 1/2), 424.14 (j = 3/2) [2] и естественная ширина распада $1s$ –вакансии Γ_{1s} = 0.59 эВ [3]

Список литературы

1. Tulkki J., Åberg T. // J. Phys. B. 1980. V. 13. P. 3341.
2. Nrisimhamurty M. et. al. // Phys. Rev. A. 2015. V. 91. P. 013404.
3. Chen M.H. et. al. // Phys. Rev. A. 1981. V. 24. P. 1845.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ
Санкт-Петербургский государственный университет

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЯЗАННОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЫ

С помощью точного расчета волновой функции проведен сравнительный анализ информации Фишера, информационной энтропии Шеннона и математического ожидания плотности вероятности для нижних связанного и разлетного электронных состояний H_2^+. Установлено, что зависимости от межъядерного расстояния этих характеристик, полученных совместно для координатного и импульсного пространств, имеют минимум для устойчивого состояния, в отличие от разлетного состояния.

S.A. ASTASHKEVICH
Saint-Petersburg State University

STUDY OF THE INFLUENCE OF STABILITY OF ELECTRONIC STATES ON INFORMATION-THEORETIC MEASURES OF THE MOLECULE

Using the exact calculation of the wave function a comparative analysis of the Fisher information, Shannon information entropy and expected value of probability density for the lowest bound and unbound electron states of H_2^+ was performed. It is established that the dependencies on the internuclear distance of these characteristics, obtained jointly in the position and momentum spaces, have a minimum for the bound state in contrast to the unbound one.

Теоретико-информационные характеристики систем представляют большой интерес для квантовой информатики и интерферометрии [1, 2]. Для плотности вероятности ρ_γ (γ соответствует вектору в координатном (r) или импульсном (p) пространствах) информация Фишера I_γ, информационная энтропия Шеннона S_γ и математическое ожидание самой плотности вероятности (disequilibrium) D_γ определяются выражениями:

$$I_\gamma = \int [(\nabla\rho_\gamma)^2/\rho_\gamma]\, d\gamma, \quad (1)$$

$$S_\gamma = -\int \rho_\gamma \ln(\rho_\gamma) d\gamma, \quad (2)$$

$$D_\gamma = \int (\rho_\gamma)^2\, d\gamma, \quad (3)$$

где интегрирование выполняется по всей области переменной γ.

Нами были рассчитаны зависимости от межъядерного расстояния R этих информационных характеристик в координатном и импульсном

представлении для нижних связанного ($1s\sigma_g$) и разлетного ($2p\sigma_u$) электронных состояний молекулы H_2^+, используя результаты точного расчета волновой функции [3, 4]. Результаты расчета величин $F_{rp} = F_r F_p$, $S_{rp} = S_r + S_p$ и $D_{rp} = D_r D_p$, полученных совместно для координатного и импульсного представления плотности вероятности, приведены на рис. 1. Пунктирной линией на этом рисунке отмечено теоретически минимально возможное значение величин $F_{rp} = 36$ и $S_{rp} = 3(1+\ln(\pi))$, а большими значками – значения, полученные в моделях объединенного атома и раздельных атомов. Видно, что зависимости от R всех этих информационных характеристик имеют минимум для устойчивого состояния, в отличие от разлетного состояния [4]. Кроме того, математическое ожидание плотности вероятности D_{rp} для состояния $1s\sigma_g$ имеет локальный максимум при R=6.977 а.е., что иллюстрирует сложный характер образования химической связи даже для простейшей двухатомной молекулы – H_2^+.

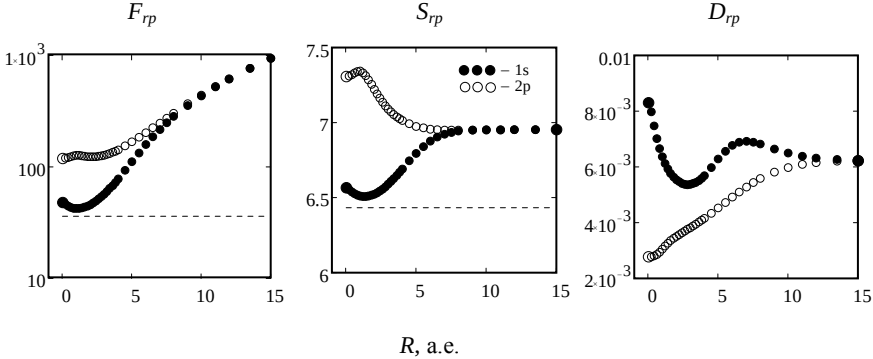


Рис 1. Зависимости (в атомных единицах) информации Фишера F_{rp}, информационной энтропии Шеннона S_{rp} и математического ожидания плотности вероятности D_{rp} от межъядерного расстояния R для $1s\sigma_q$ и $2p\sigma_u$ состояний H_2^+

Полученные результаты представляют интерес для квантовой информатики и квантовой физики и химии образования связи в молекулах.

Список литературы

1. Statistical complexity: applications in electronic structure. ed. by K.D. Sen. Berlin: Springer, 2011.

2. Concepts and recent advances in generalized information measures and statistics. ed. by A.M. Kowalski, R.D. Rossignoli, E.M.F. Curado. Bentham Science Publishers, 2013.

3. Astashkevich S.A. // Phys. Lett. A. 2017. V. 381. № 31. P. 2554.

4. Astashkevich S.A. // Phys. Lett. A. 2019. V. 383. № 24. P. 2854.

УДК 535(06)+004(06)

Л.К. ЕРМАКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ ПО ЭНЕРГИИ В P_4 - Se_3

Методом разложения функции Грина в непрерывную дробь рассчитана локальная плотность электронных состояний (ЛПС) в $P_4 – Se_3$. Получено удовлетворительное соответствие пиков ЛПС с экспериментом по фотоионизации. Выяснено, что наибольший вклад в ЛПС дают p-функции селена «π» ориентации.

L.K. ERMAKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

DISTRIBUTION OF DENSITY OF ELECTRONIC STATES ON ENERGY IN P_4 - Se_3

The method of decomposition of Green function in continued fraction calculated the local density of electronic states (LDS) in $P_4 – Se_3$. Satisfactory compliance of peaks of LDS with an experiment on photoionization is obtained. It is found out that p-functions of selenium of «π» - orientation give the greatest contribution to LDS.

Использование в оптических волоконных системах этого соединения весьма перспективно. Построение таких систем важно ввиду предстоящей цифровизации нашей жизни и экономики [1]. Ввиду этого представляет несомненный интерес его структура электронных состояний и в частности локальная плотность состояний (ЛПС). Разработанные к настоящему времени методы расчёта ЛПС, с применением разложения мнимой части функции Грина в непрерывную дробь (НД), позволяют получить ЛПС минуя построение зоны Бриллюэна [2, 3]. Если использовать для построения функции Грина гамильтониан в базисе ЛКАО, то можно получить не только распределение ЛПС по энергии, но и по пространству, то есть в точках центрирования атомных орбиталей (АО). Это достигается разворачиванием НД начиная с конкретной АО определённого атома. Гамильтониан в рамках метода ЛКАО строился в базисе s- и p- АО Слэйтеровского типа, параметры которых приведены в работе [4]. Вследствие симметрии молекулы (точечная группа C_{3v}) гамильтониан распадается на три блока, которые соответствуют неприводимым представлениям (НП) данной группы: A_1, A_2 и E, с матрицами размером (8 x 8), (2 x 2) и (9 x 9), соответственно.

Программа написана на языке FORTAN – IV и содержит около 1000 операторов данного языка. Хорошее согласие с экспериментом даёт расчет для молекулы сжатой на 10 % вдоль главной оси. Это моделирует температурные искажения, так как экспериментальные графики даны для температуры 180 С. Так как гамильтониан симметризован, это позволяет получать ЛПС по группам атомов и их АО одинаковых позиций в молекуле, что сокращает объём выдаваемой в ходе расчетов информации за счет суммирования ЛПС одинакового типажа и устранения таким образом ненужных повторов.

Сравнение с экспериментом [5] удовлетворительное: максимумы спектра фотоионизации при 8.92, 10.36 и 12.62 эВ соответствуют полученным пикам ЛПС для НП Е – типа точечной группы C_{3v}. Выяснилось, что наибольший вклад дают АО р-типа селена «π» ориентации.

Список литературы

1. Меркурьев С.В., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 1. С. 45-49.
2. Solid State Physics. 1980. V. 35. Acad. Press, N.Y.
3. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
4. Clementi E., Raimondi D.L. // J. Chem. Phys. 1963. V. 38. P. 2686-2689.
5. Cannigton P.H., Whitfield H.J. // J. of Electron Spectroscopy. 1977. V. 10. P. 35-44.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Е. АЛЕКСЕЕВ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ[1]
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
[1]Московский технический университет связи и информатики

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАЗЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+}) С НЕМОНОТОННЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

Представлены результаты моделирования динамики возникающих термоупругих напряжений и оптической плотности кристалла ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+}) при импульсной накачке, в условиях, когда профиль распределения Fe(Cr) в кристалле ZnSe немонотонен, как вдоль оптической оси, так и в поперечном направлении. Показано, что за счет выбора специального профиля легирования можно существенно увеличить выходную энергию и мощность ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+}) лазера за счет снижения термооптических искажений вдоль оптической оси и подавления паразитной генерации в поперечном направлении.

E.E. ALEKSEEV, S.Yu. KAZANTSEV[1]
National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow
[1]Moscow Technical University of Communications and Informatics

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD FOR CALCULATING LASER CHARACTERISTICS OF ZnSe:Fe^{2+} CRYSTALS WITH A NON-MONOTONE DOPING PROFILE

The results of modeling the dynamics of the occurring thermoelastic stresses and optical density of a ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+}) crystal during pulsed pumping are presented under conditions when the distribution profile of Fe(Cr) in a ZnSe crystal is nonmonotonic both along the optical axis and in the transverse direction. It was shown that by choosing a special doping profile, the output energy of the ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+}) laser can be significantly increased by reducing thermo-optical distortions along the optical axis and suppressing parasitic generation in the transverse direction.

К основным областям применения ZnSe:(Cr^{2+})Fe^{2+} лазеров относятся: дистанционный контроль окружающей среды, лазерные системы воздушной связи, спектроскопические исследования, медицина, получение мощных фемтосекундных импульсов, а также разработка систем оптико-электронного противодействия [1]. Создание качественных лазерных кристаллов Fe^{2+}:ZnSe с большими поперечными размерами требует значительных затрат, поэтому замена прямого

экспериментального моделирование адекватным расчетом является актуальной задачей [2].

Целью работы является разработка пакета программ для анализа лазерных характеристик и моделирования термоупругих напряжений, возникающих при импульсно-периодической накачке кристаллов $ZnSe:Fe^{2+}(Cr^{2+})$ с произвольным профилем легирования. Для моделирования термоупругих напряжений и оптической плотности лазерного кристалла применялся метод конечных элементов. Моделирование импульсного режима накачки показало, что наиболее высокие искажения возникают в момент времени, когда произведение мощности накачки на коэффициент поглощения максимален. При одинаковой энергии, поглощенной в кристалле, можно за счет выбора специального (немонотонного, как вдоль оптической оси, так и в поперечном к ней направлении) профиля легирования кристалла ZnSe значительно снизить искажения оптической плотности, термоупругие напряжения, а также подавить развитие паразитной генерации, которая ограничивает выходную энергию Fe^{2+}:ZnSe лазера [3, 4]. Для расчетов составлялась конечно-элементная модель (рис. 1), применялись 20 узельные изопараметрические конечные элементы с 27 узлами интегрирования [5]. Пример расчета интенсивности напряжений приведён на рис. 2.

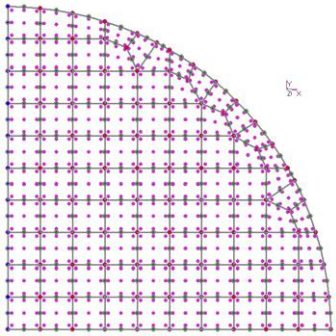


Рис. 1. Конечно элементная модель ¼ цилиндра кристалла

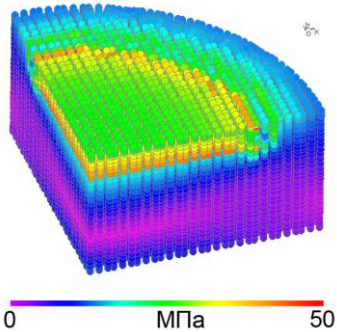


Рис. 2. Пример расчета интенсивности напряжений

Список литературы

1. Mirov S., et. al. // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2015. V. 21. P. 1601719.
2. Kurashkin S.V., et. al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. P. 025002.
3. Gavrishchuk E.M. et. al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45(9), P. 823.
4. Firsov K.N., et. al. // Laser Physics Letters. 2016. V. 13(5), P. 055002.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. КОЖЕВНИКОВ, В.Е. ПРИВАЛОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ГЕОМЕТРИЯ СЕЧЕНИЯ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА He-Ne ЛАЗЕРА И МОЩНОСТЬ ЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложен метод оценки мощности излучения He-Ne лазера для произвольного поперечного сечения активного элемента, основанный на введение эффективного модового объема и нахождении инверсии населенностей активной среды. Он проверен для цилиндрического и прямоугольного лазеров.

V.A. KOZHEVNIKOV, V.E. PRIVALOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

He-Ne LASER ACTIVE ELEMENT SECTION GEOMETRY AND ITS POWER

A method is proposed for estimating the radiation power of a He-Ne laser for an arbitrary cross section of the active element, based on the introduction of an effective mode volume and finding the population inversion of the active medium. It is tested for cylindrical and rectangular lasers.

Энергетической характеристикой моды принято считать модовый объем резонатора. Однако модовый объем не учитывает ни распределения инверсии населенностей активной среды δN, ни того, что значения интенсивностей поля на оси зеркал резонатора разные (и соответственно отличаются интенсивности на боковых границах модового объема). Поскольку в дипольном приближении мощность индуцированного излучения лазера можно считать пропорциональной произведению $|E|^2\delta N$, где $|E|$ – модуль напряженности поля в резонаторе, δN – распределение инверсии населенностей активной среды, то нами было введено понятие эффективного модового объёма NMV – как тело, ограниченное поверхностью, где величина $E^2\delta N$ спадает в e^2 раз по сравнению со значением на оси. Тогда для оценки мощности излучения лазера P предлагается использовать формулу $P = \iiint\limits_{NMV} \varepsilon \, |E|^2 \, \delta N dV$ (ε – соответствующий коэффициент пропорциональности). Для He-Ne лазера в первом приближении распределение δN удовлетворяет однородному уравнению Гельмгольца с однородным граничным условием. В [1] нами предложен метод нахождения приближенного

решения такого уравнения, который был проверен [2] для сечений, допускающих аналитическое решение – прямоугольник, круг, эллипс. Таким образом, получаем метод оценки мощности излучения лазера с произвольной геометрией сечения трубки, который сводится к нахождению границ *NMV*, распределения δN и поля E (последнее известно для моды данного резонатора).

Нами были получены уравнения поверхности, ограничивающей *NMV*, для круглого, прямоугольного и эллиптического сечений. Расчет для круглого и прямоугольного сечений показал хорошее согласие с экспериментальными значениями для He-Ne лазера. В настоящее время планируется расчет для эллиптического сечения и поиск оптимального по мощности сечения лазера. Надеемся, что эти результаты могут быть полезны и в задачах, решаемых авторами [3-5].

Список литературы

1. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // НТВ СПбГПУ. Физ.-мат. Науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 84-95.

2. Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Shemanin V.G. // Optical Memory and Neural Networks. 2019. V. 28. No. 3. P. 215-221.

3. Nepomnyashchaya E.K., Velichko E.N., Pleshakov I.V., Aksenov E.T., Savchenko E.A. Investigation of ferrofluid nanostructure by laser light scattering: medical applications // J. Physics: Conference Series. 2017. V. 841. P. 012020.

4. Putintseva M.V., Aksenov E.T., Korikov C.C., Velichko E.N. Non-invasive research of biological objects by the method of laser polarimetry // J. Physics: Conference Series. 2018. V. 1124. P. 031021.

5. Volkov V.A., Gordeev D.A., Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I. Photonic beamformer model based on analog fiber-optic links' components // J. of Physics: Conf. Series. 2017. V. 737(1). P. 012002.

УДК 535(06)+004(06)

С.Ю. КАЗАНЦЕВ, В.В. КИСЕЛЕВ[1], В.М. МАРЧЕНКО
Московский технический университет связи и информатики
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Ti^{3+}:Al_2O_3 ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований температурной зависимости спектров термического излучения монокристалла Ti^{3+}:Al_2O_3 в видимой и ближней ИК области спектра при лазерно-термическом нагреве. Установлено, что термические спектры Ti^{3+}:Al_2O_3 в температурном интервале T = 350 - 950 K существенно отличаются от спектра излучения черного тела и являются селективными с максимумом на $\lambda \approx 1060$ nm. Рассмотрены различные возможные практические применения этого эффекта.

S.Yu. KAZANTSEV, V.V. KISELEV[1], V.M. MARCHENKO
Moscow Technical University of Communications and Informatics
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

FEATURES OF THE SPECTRA OF THERMAL RADIATION OF THE Ti^{3+}:Al_2O_3 BY LASER HEATING PROFILE

The results of experimental studies of the temperature dependence of the thermal radiation spectra of a single crystal Ti^{3+}:Al_2O_3 in the visible and near infrared spectral region under laser thermal heating are presented. It was found that the thermal spectra of Ti^{3+}:Al_2O_3 in the temperature range T = 350 – 950 K differ significantly from the spectrum of black body radiation and are selective with a maximum at $\lambda \approx 1060$ nm. Practical applications of this effect are considered.

В настоящее время рынок коммерческих фотовольтаических электрогенераторов (ФВЭ), предназначенных для преобразования световой энергии в электрическую, занимают ФВЭ, созданные на основе кристаллического кремния, область спектральной чувствительности которого составляет $\Delta\lambda_{Si}$ = 0.4 - 1.1 мкм [1]. В отсутствие солнечного света вместо ФВЭ могут применяться термофотовольтаические электрогенераторы (ТФВЭ), основанных на преобразовании энергии излучения раскаленных материалов. Для повышения КПД таких ТФВЭ актуален поиск селективных эмиттеров (СЭ) термического излучения в области $\Delta\lambda_{Si}$. Во всем мире сейчас активно ведутся исследования в области технологии создания термофотовольтаических электрогенераторы ТФВЭ на конверсии тепловой энергии прозрачных оксидов металлов,

активированных редкоземельными ионами [1]. Поэтому создание эффективных СЭ для кремниевых ТФВЭ является актуальной задачей. Ранее были обнаружены и исследованы спектры селективного термического излучения иона переходного металла Cr^{3+} в рубине Al_2O_3:Cr^{3+} [2]. В данной работе такая же методика была применена для экспериментального исследования температурной зависимости спектра термического излучения Al_2O_3:Ti^{3+}.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Излучение непрерывного электроразрядного CO_2-лазера на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм нагревало кристалл Al_2O_3:Ti^{3+}. Спектры термического излучения монокристалла регистрировались спектрометром AvaSpec-2048 с волоконно-оптическим входом на расстоянии 3 - 5 см от кристалла.

Установлено, что термические спектры Al_2O_3:Ti^{3+} в области температур T = 350 - 950 K существенно отличаются от спектра излучения черного тела и являются селективными. Нормированные спектры термического излучения монокристалла Al_2O_3:Ti^{3+} имеют ясно выраженный максимум вблизи 1060 нм (рис. 2). Эти СЭ могут быть востребованы для конверсии тепловой энергии выделяемой: в результате ядерных реакций деления и синтеза; радиоактивного распада и при сжигании мусора.

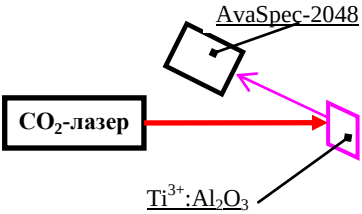


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

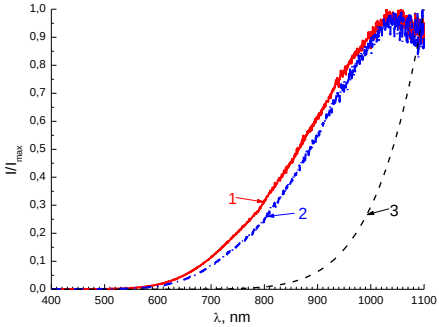


Рис. 2. Нормализованные термические спектры излучения кристалла: 1 – экспериментальный спектр при T = 878 K; 2 – экспериментальный спектр при T ≈ 500 K; 3 – расчетный спектр излучения черного тела для T = 900 K

Список литературы

1. Миличко В.А. и др. // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. С. 801-852.
2. Marchenko V.M., Kiselev V.V. // Journal of Applied Spectroscopy. 2017. V. 83. P. 1042-1044.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. АСТАШКЕВИЧ, С.В. БОРОВЫХ, А.А. МИТЮРЕВА,
В.В. СМИРНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ДИНАМИКА ФОТОИОНИЗАЦИИ H_2 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАКОРОТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты вычислений динамики фотоионизации молекулы H_2 под действием ультракороткого рентгеновского излучения сверхатомной интенсивности на основе ранее разработанного квазиклассического тракторного метода.

S.A. ASTASHKEVICH, S.V. BOROVYKH, A.A. MITYUREVA,
V.V. SMIRNOV
Saint Petersburg State University

PHOTOIONIZATION DYNAMICS OF H_2 UNDER THE ACTION OF STRONG ULTRASHORT X-RAY RADIATION

The results of calculations of the photoionization dynamics of an H_2 molecule under the action of ultrashort X-ray radiation of superatomic intensity based on the previously developed semiclassical trajectory method are presented.

Процесс фотоионизации атомов и молекул имеет большое значение в различных средах и интерес к нему возрос в связи с разработкой источников ультракороткого сильного поля. В настоящей заметке представлены результаты вычислений динамики фотоионизации молекулы водорода. Расчеты проводились на основе квазиклассического траекторного метода, развитого в наших работах [1, 2]. Эффективность метода была ранее продемонстрирована на расчетах фотоионизации атомов водорода, гелия [3] и лития [2], а также молекулярного иона водорода [1].

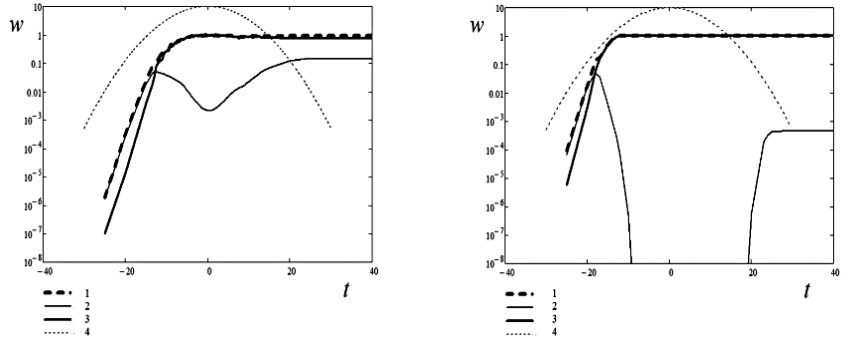
Рассматривался ультракороткий импульс рентгеновского излучения сверхатомной интенсивности. Используется атомная система единиц. Расчеты проводились для длительности импульса $\tau = 30$ (~ 0.8 фс). Интенсивность излучения представлена безразмерным параметром Фейсала χ, который равен отношению дополнительного кинетического импульса электрона в поле излучения к характерному импульсу электрона в атоме.

При параметре Фейсала $\chi << 1$ поле являются слабыми, $\chi \sim 1$ – промежуточным ("атомным"), $1 < \chi < c$ – сверхатомным с интенсивностью вплоть до релятивистской, $c \leq \chi$ – поле релятивистской интенсивности, $c = 137$ – скорость света в атомных единицах.

Полученные результаты относятся к равновесному межатомному расстоянию и усреднены по ориентациям оси молекулы к направлению линейно поляризованного излучения. За время длительности импульса межатомное расстояние практически остается неизменным.

На рис. 1 представлена динамика вероятности фотоионизации w молекулы водорода для энергии фотона $\omega = 135$ eV. Длительность импульса $\tau = 30$ (~ 0.8 фс); t – время в атомных единицах. Параметр Фейсала $\chi = 7.3$ (рис. 1*а*) и 51 (рис. 1*б*). Линии: 1– полная, 2 – однократная, 3 – двукратная ионизация, 4 – относительная величина модуляции импульса излучения.

Из рис. 1 видно, что в сверхатомном поле с $\chi = 7.3$ локализация электронов вблизи ядер молекулы водорода в виде однократного иона сохраняется в пределах длительности импульса на уровне 0.001 – 0.01. В поле близком к релятивистской интенсивности с $\chi = 51$ все электроны делокализованы, что исключает возможность наблюдения структуры объекта из картины рентгеновской дифракции.



а *б*

Рис. 1. Динамика вероятности фотоионизации при $\chi = 7.3$ (*а*) и 51 (*б*)

Список литературы

1. Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2018. V. 382. № 28. P. 1881-1884.

2. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Rezikyan A.G., Smirnov V.V. // J. Phys. B. 2017. V. 50. № 19. P. 195601.

3. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 1263-1266.

УДК 535(06)+004(06)

Х. БАЗЗАЛ, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖИМПУЛЬСНОГО ИНТЕРВАЛА НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ AlO ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЕВУЮ МИШЕНЬ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Изучено влияние энергии и межимпульсного интервала на процесс образования AlO в лазерной плазме при воздействии мощных одиночных и сдвоенных лазерных импульсов ($\approx 10^9 - 5.10^{10}$ Вт·см$^{-2}$) на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показано, что при увеличении энергии и межимпульсного интервала от 0 до 50 мкс максимальная скорость образования AlO наблюдается в интервале от 5 до 12 мкс.

Kh. BAZZAL, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State University, Minsk, Belarus

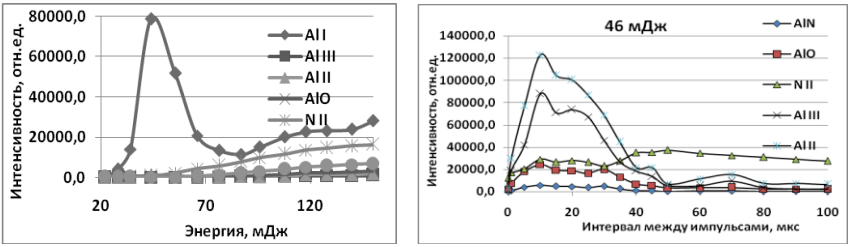
STUDY OF THE INFLUENCE OF INTER-PULSE INTERVAL ON THE PROCESSES OF FORMATION OF AlO WHEN EXPOSED TO ALUMINUM TARGET BY DOUBLE LASER PULSES

The effect of the energy and interpulse time on the processes of AlO formation in the laser plasma due to the effect of high-power single and double laser pulses ($\approx 10^9 - 5.10^{10}$ W.cm^{-2}) on the surface of the aluminum-alloy target in the air has been studied experimentally. It has been shown that, with an increase in the energy and of the interpulse time from 0 to 50 μm, a maximal rate of the AlO formation is varying over the interval 5 - 12 μs.

Развитие методов синтеза наночастиц (НЧ) с требуемыми свойствами, главными из которых являются размер, форма, химический состав, структура и степень агломерации НЧ, является важной практической задачей.

Динамику процессов образования AlO исследовали в атмосфере воздуха при воздействии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на пластинку из алюминиевого сплава Д16Т (толщина 1 мм) в зависимости от энергии (10 - 60 мДж) и временного интервала между сдвоенными импульсами (0 - 100 мкс). Размер точки фокусировки ≈ 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм.

На рис. 1*а* представлены графики зависимостей изменения интенсивностей линий в спектрах от энергии моноимпульса (интервал между импульсами равен 0 мкс). На рис. 1*б* представлены зависимости интенсивности линий от интервала между импульсами при энергии импульсов 46 мДж.



а *б*

Рис. 1. Зависимости: интенсивности линий от энергии при интервале 0 мкс (*а*); интенсивности линий от интервала между первым и вторым импульсом (*б*)

Из приведенных данных видно, что при воздействии первого импульса происходит энергичное испарение атомов алюминия. Этот рост происходит с увеличением энергии примерно до 45 - 50 мДж, при дальнейшем увеличении энергии до 100 мДж скорость его образования падает в 2 - 3 раза. Наблюдается также значительный рост количества ионов азота. Что касается полосы AlO, то с увеличением энергии интенсивность ее возрастает почти на порядок, хотя абсолютные значения несравнимы с интенсивностью линий ионов алюминия. Интенсивность полосы AlN изменяется очень мало, что свидетельствует о практически полном отсутствии процесса образования AlN в приповерхностной лазерной плазме даже при большом содержании ионов активированного азота.

Как видно из приведенных на рис. 1*б* данных, наиболее существенное образование комплексов AlN, AlO и ионов алюминия (на 3 - 4 порядка) наблюдается при воздействии на образец второго импульса при задержке его в интервале 5-15 мкс. При большей задержке интенсивность линий в плазме падает, скорость образования продуктов уменьшается. В то же время интенсивность линии иона азота N II, наоборот, возрастает, т.е. процессы идут практически антибатно. Эта закономерность свидетельствует о возможности образования AlN из ионов Al и N. При падении числа ионов Al в плазме, несмотря на сохранение количества образующих ионов N II, вероятность образования AlN резко уменьшается.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Г. ГУСЕЙН-ЗАДЕ[1], И.В. ЖЛУКТОВА[1], С.Ю. КАЗАНЦЕВ[2], В.А. КАМЫНИН[1], С.В. ПОДЛЕСНЫХ[1], В.Е. РОГАЛИН[3], А.И. ТРИКШЕВ[1], С.А. ФИЛАТОВА[1], В.Б. ЦВЕТКОВ[1,4]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Московский технический университет связи и информатики
[3]Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[4]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ, ФОРМИРУЕМОЙ В ЛАЗЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ АНТЕННАХ

Создан экспериментальный стенд и отработаны методики исследования пространственно-временной эволюции плазмы, создаваемой при работе лазерных плазменных антенн. Представлены первые результаты исследований характеристик полупроводниковой плазмы, формируемой в кристаллах Ge при воздействии непрерывного и импульсно-периодического лазерного излучения с λ = 975 nm и λ = 1.08 μm.

N.G. GUSEIN-ZADE[1], I.V. ZHLUKTOVA[1], S.Yu. KAZANTSEV[2], V.A. KAMYNIN[1], S.V. PODLESNYKH[1], V.E. ROGALIN[3], A.I. TRIKSHEV[1], S.A. FILATOVA[1], V.B. TSVETKOV[1,4]

[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Moscow Technical University of Communications and Informatics
[3]Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint-Petersburg
[4]National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

SPACE-TEMPORARY EVOLUTION OF ELECTRON-HOLE PLASMA FORMED IN LASER SEMICONDUCTOR PLASMA ANTENNA

An experimental setup was created and methods for studying the spatio-temporal evolution of plasma created by laser plasma antennas were developed. The first results of studies of the plasma formed in Ge when exposed to continuous and repetitively pulsed laser radiation with λ = 975 nm and λ = 1.08 μm are presented.

В работе [1] впервые были предложены лазерные полупроводниковые плазменные антенны (ЛППА) и продемонстрирована эффективность применения ЛППА в приемо-передающих устройствах. Поэтому

исследование характеристик полупроводниковой (ПП) плазмы, создаваемой в ЛППА, актуально.

Целью работы является создание экспериментального стенда и отработки экспериментальных методик для исследования эффективности генерации ПП плазмы в ЛППА, а также исследование пространственно-временной эволюции концентрации неравновесных носителей, создаваемых в ПП структурах при лазерном облучении. На рис. 1 представлена схема созданной экспериментальной установки. С помощью лазера (L_1) с $\lambda \approx 1$ мкм и $P_{пик} \approx 1$ кВт осуществлялась генерация плазмы (П), а по ослаблению прошедшего излучения лазера (L_2) с энергией кванта меньшей запрещенной зоны ($\lambda \geq 2$ мкм), осуществлялась зондирование ПП структуры, и восстанавливался профиль концентрации неравновесных носителей. На основе измерений проводимости Ge и величины пропускания для излучения лазера L_2 при облучении кристалла лазером L_1 (рис. 1, схема слева) установлено, что численная модель нелинейного пропускания Ge, которая использовалась в [2], дает на порядок более завышенные значения концентрации ПП плазмы. Удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментом было получено после того, как в численной модели была учтена диффузия неравновесных носителей из области, облучаемой лазером L_1. Диффузия неравновесных носителей из области облучения изучалась на установке, показанной на рис. 1, схема справа.

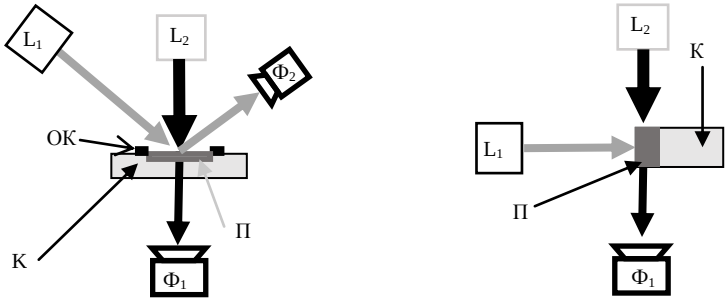


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: L_1 - лазер с длиной волны λ = 0.975 - 1.08 мкм; L_2 – лазер с длинной волны λ = 2 - 3 мкм; К – кристалл Ge(Si); $Ф_1$, $Ф_2$ – фотоприемники; П – электронно-дырочная плазма; ОК – омические контакты, нанесенные на поверхность полупроводникового кристалла

Список литературы

1. Bogachev N.N., Gusein-zade N.G. et. al. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45(12). P. 1223-1225.
2. Alekseev E.E., Firsov K.N. et. al. // Physics of Wave Phenomena. 2017. V. 25(4). P. 280-288.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. РЫМКЕВИЧ, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА С НАНОРАЗМЕРНОЙ ГЛУБИНОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ

Исследован процесс формирования структур на поверхности прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой. Обнаружено влияние образующихся в процессе записи кратеров на разрешающую способность метода. Продемонстрировано полезное применение данного эффекта для увеличения разрешающей способности метода.

V.S. RYMKEVICH, M.M. SERGEEV
ITMO University, Saint-Petersburg

DYNAMIC OF NANOSIZED DEPTH RELIEF FORMATION ON FUSED SILICA BY LASER INDUCED MICROPLASMA ACTION

The process of formation of structures on the surface of transparent materials by laser-induced microplasma is investigated. It was found that the resolution of the method is affected by craters formed during the recording process. The useful application of this effect to increase the resolution of the method has been demonstrated.

Лазерно-индуцированные методы — это многообещающий инструмент в области обработки стеклообразных материалов, обеспечивающий высокую разрешающую способность по глубине и легкость в использовании. Одним из этих методов является обработка Лазерно-Индуцированной Микро Плазмой (LIMP). В основе обработки лежит следующий механизм: лазерное излучение (ЛИ) проходит сквозь оптически прозрачный материал и взаимодействует с высоко поглощающей графитовой мишенью. В результате воздействия образуется плазменный факел, который взаимодействуя со стеклянным материалом, формирует микро и нано-рельеф [1]. Было обнаружено, что предложенный метод позволяет изготавливать структуры с глубиной рельефа от 100 до 500 нм и шероховатостью 50 нм. Благодаря LIMP были успешно изготовлены дифракционные, фазовые и даже многоуровневые микро оптические элементы [2].

Очевидно, что разрешение метода LIMP (так же как у LIPAA, LIBDE, и др.) определяется не только точностью фокусировки, но и зазором между мишенью и тыльной поверхностью стекла [3, 4]. Зазор изменяется после каждого импульса, так как на месте воздействия плазменного факела в образце формируется кратер в виде микролинзы, которая может оказывать влияние на разрешающую способность метода в зависимости от расстояния между мишенью и образцом.

Цель работы заключалась в определении влияния микролинзы на размер записываемых структур в зависимости от начального положения центра перетяжки лазерного излучения.

В ходе исследования был записан набор линий с использованием микрообъектива 10 x 0.3 с различным положением центра перетяжки: на границе раздела (1), в стекле (2) и в графите (3) (рис. 1).

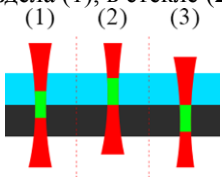


Рис. 1. Положения центра перетяжки

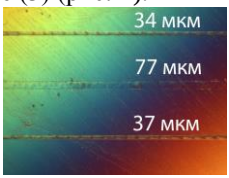


Рис. 2. Поперечные размеры треков, P = 10 Вт

Размеры записанных структур были исследованы методом оптической микроскопии в режиме дифференциально-интерференционного контраста. На рис. 2 приведены размеры одной группы таких линий. Из анализа структур видно, что наиболее тонкий трек был получен при обработке в сходящемся пучке. Это может быть связано с перефокусировкой излучения микролинзой. Структура, записанная в расходящемся пучке, формировалась более широкой, и, как показали результаты контактной профилометрии, являлась менее глубокой чем две другие. Полученные зависимости сохранялись при изменении плотности мощности излучения, однако, при уменьшении длительности импульса центральная структура постепенно исчезала.

Список литературы

1. Veiko V.P., Volkov S.A. et. al. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // Quantum Electronics. 2017. V. 47 (9). P. 842.

2. Rymkevich V.S., Zakoldaev R.A. et. al. Using laser-induced microplasma for multilevel phase plate fabrication // Journal of Instrument Engineering. 2017. V. 60 (5). P. 431-439.

3. Hamdani A., Ansar A. et. al. Laser induced backside dry etching of BK-7 and quartz in vacuum // Key Engineering Materials. 2012. V. 510. P. 261-264.

4. Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. Micromachining of glass materials by laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) using a conventional nanosecond laser // Optoelectronics' 99-Integrated Optoelectronic Devices. 1999. V. 3618. P. 363-369.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. МЕЛЕХОВ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, В.В. КОМАРЕЦКИЙ,
Р.Ш. РАМАКОТИ, И.В. ДОМАНИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НАБЛЮДЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЯРКОСТИ СВЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРУЕМОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

С использованием стрик-камеры BIFO K-008 была проведена серия экспериментов по изучению динамики развития плазмы вакуумной искры. Были зафиксированы пульсации (осцилляции) интенсивности излучения плазмы в прианодной области разряда. Частота осцилляций составляет f = 120 - 200 МГц. Регистрация излучения плазмы проводилась в режиме линейной развертки стрик-камеры при минимальной длительности кадра t = 200 нс.

A.P. MELEKHOV, E.D. VOVCHENKO, V.V. KOMARESKY,
R.S. RAMAKOTI, I.V. DOMANINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OBSERVATION OF HIGH-FREQUENCY OSCILLATIONS OF THE BRIGHTNESS FROM LASER INITIATED VACUUM SPARK PLASMA SOURCE

Using the BIFO K-008 streak camera, a series of experiments was carried out to study the dynamics of the development of a vacuum spark plasma. The pulsations (oscillations) of the plasma radiation intensity in the anode area of the discharge were recorded. The oscillation frequency is f = 120 - 200 MHz. Plasma radiation was recorded in the linear sweep mode of the streak camera with a minimum frame duration t = 200 ns.

Как известно, вакуумная искра является широкополосным источником оптического, мягкого рентгеновского и, как оказалось, терагерцового излучения (ТИ) [1, 2]. При проведении серии экспериментов по изучению генерации ТИ вакуумной искрой, был обнаружен эффект осцилляций яркости свечения плазмы в прианодной области разряда. Процесс формирования вакуумной искры исследовался в видимом диапазоне излучения плазмы с применением высокоскоростной стрик-камеры BIFO K-008. При этом синхронно контролировались параметры разряда (рентгеновское излучение и ток разряда) и мощность ТИ плазмы разряда. На рис. 1а показан вид экспериментальной установки с системой

высокоскоростной фоторегистрации на основе стрик-камеры BIFO K-008. Величина энергии инициирующего разряд лазерного импульса E_L=8÷110 мДж при длительности $\tau \leq 20$ нс. Высвобождаемая в разряде энергия $E_D \approx 17$ Дж при напряжении между электродами U_{AK} = 12.5 кВ.

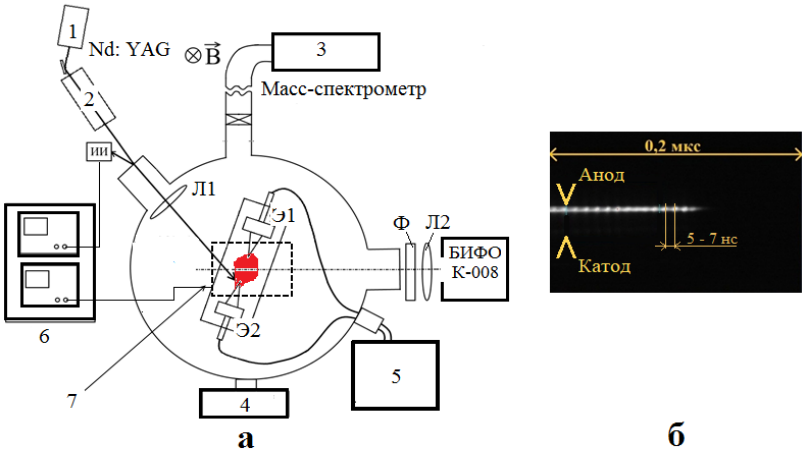


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 - лазер, 2 - лазерный усилитель; 3 - масс-спектрометр; 4 - вакуумная откачка; 5- высоковольтная система; 6 - цифровые осциллографы; Ф - светофильтр; Л1,Л2 - фокусирующие линзы; Э1, Э2 - электроды; ИИ - измеритель интенсивности лазерного излечения; 7 - положение приемника ТИ над областью разряда (а); изображение осцилляций свечения плазмы в видимом диапазоне, записанное камерой BIFOK-008 в стрик-режиме (б)

Обнаруженные в ходе экспериментов пульсации интенсивности свечения плазмы происходят в первые 200 нс после инициирования разряда. Анализ полученных со стрик-камеры изображений показал, что периоды осцилляций интенсивности лежат в пределах от 4,8 до 7 нс (частота 120 - 200 МГц). Временные параметры осцилляций слабо зависят от условий инициации вакуумной искры и наблюдались как при анодном, так и катодном режимах инициации разряда.

Список литературы

1. Kozlovskii K.I. et. al. Terahertz radiation of a low-inductance discharge in vacuum with laser-plasma initiation // VII International Conference on Photonics and Information Optics. KnE Energy. 2018.

2. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1393/1/012108/pdf.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. КОЖЕВНИКОВ, В.Е. ПРИВАЛОВ, А.Э. ФОТИАДИ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ СТОЛБ РАЗРЯДА В ЛАЗЕРНЫХ ТРУБКАХ ПЛАВНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ДИАМЕТРА

Рассмотрен положительный столб разряда постоянного тока в лазерных трубках с плавно изменяющимся диаметром разрядного канала, и получены выражения, связывающие внешние параметры столба (меняющийся радиус разрядного канала, давление напуска газа и разрядный ток) с его внутренними характеристиками (концентрацией заряженных частиц, электронной температурой, напряженностью продольного электрического поля).

V.A. KOZHEVNIKOV, V.E. PRIVALOV, A.E. FOTIADI
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

THE POSITIVE COLUMN IN LASER TUBES OF SLOWLY CHANGING DIAMETER

The positive column of the direct current discharge in laser tubes with a smoothly varying diameter of the discharge channel is considered and expressions are obtained that relate the external parameters of the column (varying radius of the discharge channel, gas inlet pressure and discharge current) with its internal characteristics (concentration of charged particles, electron temperature, and voltage longitudinal electric field).

Большинство распространенных газоразрядных лазеров используют в качестве активной среды положительный столб (ПС) тлеющего разряда постоянного тока низкого давления и имеют трубки цилиндрической геометрии. При этом активный элемент лазера помещается в оптический резонатор, имеющий, как правило, заметно отличающуюся от цилиндрической форму распределения оптического поля – что приводит к не эффективному использованию активной среды, поскольку часть возбужденных атомов цилиндрической трубки не будет участвовать в формировании выходной мощности лазера. Отсюда возникла идея использовать для газовых лазеров разрядные трубки конической геометрии [1, 2]. В литературе практически отсутствуют сведения о работах, посвященных исследованию характеристик плазмы ПС в трубках с плавно изменяющимся диаметром разрядного канала – в отличие от

изученной ранее реакции параметров ПС на скачкообразное изменение сечения положительного столба [3].

Нами был рассмотрен ПС разряда постоянного тока в типичных для активных сред газоразрядных лазеров разрядных условиях, и решена задача получения выражений, связывающих внешние параметры столба (меняющийся радиус разрядного канала, давление напуска газа и разрядный ток) с его основными внутренними характеристиками (концентрацией заряженных частиц, электронной температурой, напряженностью продольного электрического поля).

Были получены следующие выражения: зависимость концентрации электронов от тока разряда, переменного радиуса разрядного канала и зависимости электрического поля от продольной координаты; уравнение для электронной температуры, связывающее её с зависимостью радиуса разрядного канала от продольной координаты; уравнение для продольной проекции электрического поля, связывающее её с переменным радиусом разрядного канала. Получившаяся система уравнений дает решение поставленной задачи. В настоящее время проводятся численные расчеты для различных параметров ПС. Мы надеемся, что эти результаты могут быть полезны и в задачах, решаемых авторами работ [4, 5].

Список литературы

1. Привалов В.Е., Фридрихов С.А. // УФН. 1969. Т. 97. С. 377-402.

2. Привалов В.Е., Фридрихов С.А. // ЖПС. 1970. Т. 12. С. 937-939.

3. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М: Наука, 1971.

4. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Molodyakov S.A., Saenko I.I. Acousto-optical specrometers' frequency performance stability // Proceedings of SPIE. 2016. V. 5381. P. 253-257.

5. Savchenko E.A., Velichko E.N., Aksenov E.T., Nepomnyashchaya E.K. Combined method for laser selection, positioning and analysis of micron and submicron cells and particles // Proceedings of International Conference Laser Optics. 2018. P. 539.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. ХОМИЧ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, С.И. МИКОЛУЦКИЙ, В.Е. РОГАЛИН, В.А. ЯМЩИКОВ, И.А. КАПЛУНОВ[1], А.И. ИВАНОВА[1]

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
[1]Тверской государственный университет

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИМПУЛЬСА НА КАРБИД ВОЛЬФРАМА (WC-3 % Co)

Исследованы свойства поверхности твердого сплава (WC-3 % Co) после воздействия жёстко сфокусированным одиночным импульсом УФ лазера. Зафиксирована очистка поверхности от окислов и нитридов. На поверхности наблюдалась сплошная зона, покрытая следами расплавления размером ~ 1 ÷ 3 мкм.

Yu.V. KHOMICH, T.V. MALINSKIY, S.I. MIKOLUTSKIY, V.E. ROGALIN, V.A. YAMSHCHIKOV, I.A. KAPLUNOV[1], A.I. IVANOVA[1]

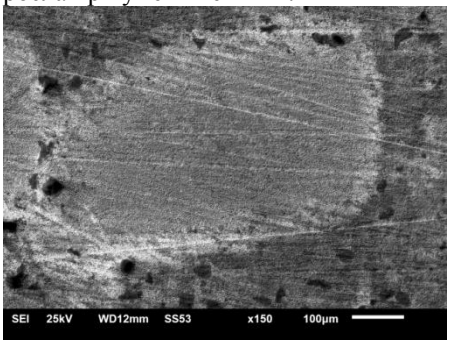
Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Tver State University

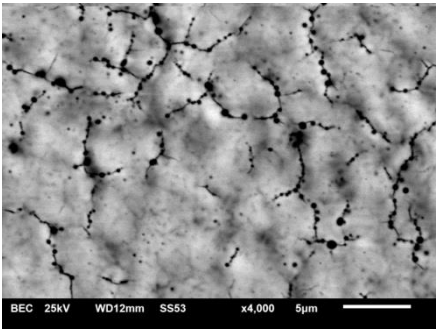
HIGH ENERGY UV LASER IMPACT ON TUNGSTEN CARBIDE (WC-3 % Co)

The properties of the surface of a hard alloy (WC-3 % Co) after exposure to a rigidly focused single pulse of a UV laser were studied. Fixed surface cleaning from oxides and nitrides. A continuous zone covered with traces of melting ~ 1 – 3 μm in size was observed on the surface.

Исследовалось поведение твердого сплава (WC-Co) после воздействия УФ наносекундными импульсами. Методика эксперимента аналогична [1]. На рис. 1 приведена РЭМ микрофотография одного и того же места образца с различным увеличением после воздействия импульса с плотностью энергии E ~ 1.6 Дж/см^2. Отчётливо видна зона воздействия лазерного импульса. В ней отсутствуют лежащие на поверхности образования (по-видимому оксиды и нитриды), в изобилии встречавшиеся на поверхности образца. Они хорошо видны на периферии облучённой зоны. На профилограммах и РЭМ микрофотографиях они отчётливо распознаются как отдельные частицы размером до ~ 5 ÷ 10 мкм, а иногда и более, лежащие на поверхности. Рентгеновский микроанализ показал,

что на участках поверхности с этими дефектами, зафиксировано, помимо основных элементов – вольфрама – W, углерода – C и кобальта – Co, значительное количество кислорода – O (до 13 %) и азота – N (до 10 %). В облученной зоне при E ~ 1.6 Дж/см^2 примеси (рис. 2) не зарегистрированы. Впрочем, при уменьшении E, начиная с E ~ 0.8 Дж/см^2 в рентгеновских спектрах появлялись линии кислорода. Их интенсивность росла при уменьшении E.





а *б*

Рис. 1. Поверхность после воздействия: один импульс с E ~ 1.6 Дж/см^2; увеличение – x 150 (*а*), увеличение – x 4000 (*б*)

При росте E (рис. 3) наблюдается рост концентрации кобальта до ~ 8 % при снижении концентрации углерода ~ 20 %. При росте количества воздействующих импульсов до 20 – Co растёт до 10 % при снижении концентрации C до 17 ÷ 18 %.

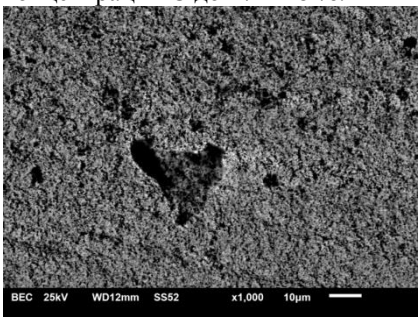


Рис. 2. Край пятна с дефектом, E ~ 1.6 Дж/см^2 , увеличение – x 1000

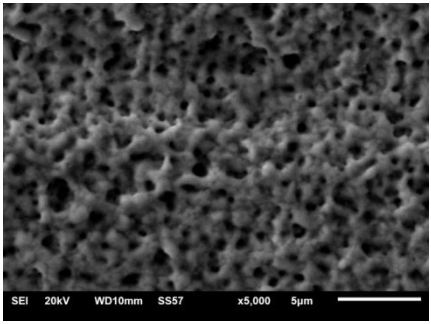


Рис 3. Поверхность после воздействия: 20 импульсов (E ~ 6.2 Дж/см^2; x 5000)

Список литературы

1. Хомич Ю.В., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И. и др. // в наст. сб. С. 191-192.

УДК 535(06)+004(06)

С.В. ГАВРИШ, В.В. ЛОГИНОВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В. ПУЧНИНА
ООО «НПП «Мелитта», Москва

ВЛИЯНИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА НАВЕДЕННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ САПФИРОВЫХ ОБОЛОЧЕК ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

В работе показано, что при прохождении УФ-излучения плазмы сквозь сапфировую оболочку в монокристаллической структуре формируются наведенные центры поглощения, которые полностью исчезают в процессе работы газоразрядной лампы за счет высокотемпературного отжига оболочки тепловыми потокам из разрядного канала

S.V. GAVRISH, V.V. LOGINOV, D.Yu. PUGACHEV, S.V. PUCHNINA
Scientific and Production Enterprise "Melitta" Ltd, Moscow

INFLUENCE OF UV PLASMA RADIATION ON THE INDUCED OPTICAL ABSORPTION OF SAPPHIRE ENVELOPE OF PULSED GAS DISCHARGE LAMPS

It is shown in the work that when the UV radiation of the plasma passes through the sapphire envelope, induced absorption centers are formed in the single crystal structure, which completely disappear during the operation of the gas discharge lamp due to the high temperature annealing of the envelope from heat fluxes of the discharge channel.

Использование сапфира (корунда) в качестве материала оболочки газоразрядной лампы делает актуальной задачу исследования его оптического пропускания при прохождении излучения сложного спектрального состава. Процесс поглощения излучения неразрывно связан с наличием дефектов в этом монокристалле. Так в литературных источниках поглощение при длинах волн 220, 285, 330, 380, 470 и 538,8 нм приписывается примесям магния, в областях 240, 315, 400 - 405, 575 - 580 нм ванадию, в диапазоне 487 - 494,8 нм титану в трёхвалентном состоянии и т.д. Неактивированным кристаллам присущи электронные и дырочные центры окраски с поглощением при длинах волн 206 и 230 нм (F-центры), 400 нм (V-центры).

Наличие интенсивных линий излучения в УФ-области приведет к появлению новых центров наведенного поглощения (НП) в сапфире. Поэтому нами изучалось изменение прозрачности корундовых труб

различной цветности (дефектности) под радиационным воздействием одиночных вспышек импульсной коаксиальной ксеноновой лампы УФ-излучения. Исследуемый образец помещался во внутреннюю полость лампы. В момент вспышки от источника просветки излучение направлялось на торцевую полированную поверхность сапфировой трубы, а с другого торца фокусировалось в монохроматор. В результате получено, что снижение прозрачности при длине волны 400 нм у бесцветных сапфировых труб не наблюдается, а у образцов, имеющих розовую окраску (предположительно примеси хрома и титана) коэффициент пропускания находится в интервале от 10 до 100 %. Столь высокий разброс параметра пропускания связан с неравномерностью концентрации примеси по длине трубы.

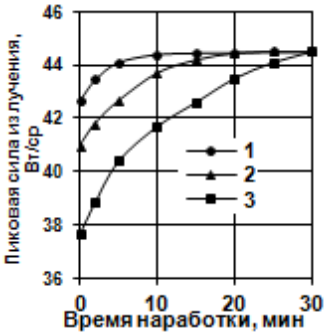


Рис. 1. Зависимость пиковой силы излучения от наработки для различных доз облучения: 10^6 (1); 10^7 (2); 10^8 (3) рад

В ходе наших исследований возник вопрос о времени жизни наведенного поглощения в сапфире. Поэтому были искусственно созданы примесные центры в кристалле. В экспериментах проводилось последовательное облучение ламп дозами 10^6, 10^7, и 10^8 рад с последующим измерением силы излучения импульсных ламп в диапазоне длин волн 0,28 ÷ 0,4 мкм в зависимости от времени наработки. Результаты испытаний приведены на рис. 1. После облучения ламп гамма-изучением имело место фиолетовое окрашивание баллона лампы, которое усиливалось с дозой облучения, что оказывало влияние на силу излучения. Видно, что максимальное снижение силы излучения облученных ламп составляло до 15 % при дозе 10^8 рад. В процессе работы лампы окрашенность исчезала, то есть происходил отжиг наведенных в сапфировой оболочке центров окраски [1] и сила излучения лампы возрастала до первоначального значения. Из полученных результатов следует, что в процессе работы газоразрядной лампы, происходят два процесса – формирование НП за счет УФ-излучения плазмы и распад центров посредством температурного отжига оболочки. Уравновешивание указанных механизмов приводит к стабилизации характеристик излучения импульсных газоразрядных ламп.

Список литературы

1. Яковлев С.А. Зависимость прозрачности белого сапфира от температуры в УФ области спектра // ПТЭ. 1962. № 2. С. 175-176.

УДК 535(06)+004(06)

В.Г. СРЕДИН[1], А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[2], О.Б. АНАНЬИН,
А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, В.А. ЮРЧАК
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
[1]Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха
[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В $Cd_xHg_{1-x}Te$ МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Обсуждается вклад внешнего фотоэффекта, возникающего при облучении слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ мягким рентгеновским излучением лазерной плазмы, на механизм формирования поверхностных дефектов в кристаллическом материале.

V.G. SREDIN[1], A.V. VOITSEKHOVSKII[2] , O.B. ANAN'IN,
A.P. MELEKHOV, R.S. RAMAKOTI, V.A. YURCHAK
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
[1]Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Forces, Balashikha
[2]National Research Tomsk State University

MICROSCOPIC MECHANISM OF SURFACE DEFECTS FORMATION IN $Cd_xHg_{1-x}Te$ BY SOFT X-RAY RADIATION

The contribution of the external photoeffect arising during irradiation of $Cd_xHg_{1-x}Te$ layers by soft x-ray radiation of laser plasma to the mechanism of surface defects formation in the crystalline material is discussed.

Ранее было показано, что под действием мягкого рентгеновского излучения (МРИ) лазерной плазмы происходит модификация поверхности монокристаллов и эпитаксиальных слоев твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ [1], а также возникает генерация устойчивых дефектов, которые приводят к росту концентрации свободных носителей заряда [2]. Предполагается, что причиной возникновение дефектов в экспериментах с рентгеновским облучением кристаллов является релаксация электронных возбуждений внутренних оболочек ионов[3]. В случае с $Cd_xHg_{1-x}Te$ мы предполагаем существование дополнительного механизма, связанного с генерацией интенсивного импульсного электрического поля как следствие внешнего фотоэффекта [2]. В настоящей работе продолжено исследование вклада фотоэффекта на процесс дефектообразования в $Cd_xHg_{1-x}Te$ с использованием источника МРИ со спектром представленным на рис. 1.

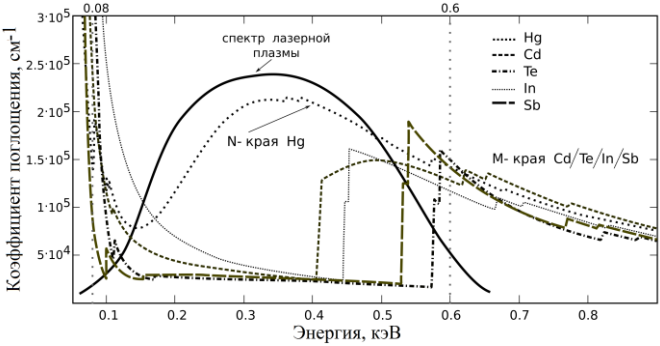


Рис. 1. Спектр лазерно-плазменного источника МРИ и спектры поглощения Cd, Te, In, Te и Hg

При поглощении кванта МРИ происходит возбуждение одной из внутренних оболочек иона на глубине до 1.5 мкм и генерация импульса электрического поля с амплитудным значением напряженности около 10^8 В/м. В этом приближении глубина потенциальной ямы катиона соответствует энергии его связи, при сообщении которой он может покинуть узел с образованием точечного эффекта. Рассчитанные в [4] значения энергии потенциальных минимумов для $Cd_{0.25}Hg_{0.75}Te$ составляет 0.944 эВ для связи Cd – Te и 0.048эВ для Hg–Te. Возбужденный ион совершает тепловые колебания относительно положения равновесия, определяемого минимумом потенциальной ямы. Энергия, сообщаемая внешним полем такому иону, может быть оценена как $\Delta q \times E \times \Delta x \sim 5\times10^{-2}$ эВ (здесь $\Delta q = 3e$ – заряд дополнительно ионизированного МРИ иона, $E = 10^8$ В/м – напряженность наведенного поля, Δx – смещение от положения равновесия). В совокупности с тепловой энергией колебаний энергия возмущения возбужденного иона составляет 0.061 эВ, что сопоставимо с глубиной потенциальной ямы. Таким образом, влияние наведенного фотоэмиссией поля достаточно для генерации точечного дефекта при наличии иона Hg с возбужденной внутренней оболочкой.

Список литературы

1. Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д., Мирофянченко А.Е., Мелехов А.П., Новиков И.К. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 17-20.

2. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Прикладная физика, 2018. № 4. С. 54-60/

3. Вавилов В.С. // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407.

4. Sher A., Chen A., Spicer W.E., Shin C.-K. // J. Vac. Sci. Technol. 1985. V. A3. № 3. P. 105.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. СИДОРОВ[1,2], А.Б. БУХАРИНА[1], А.В. ПЕНТО[1],
Р.С. АБЛИЗЕН[1], С.М. НИКИФОРОВ[1], К.Ю. КРАВЕЦ[3]
[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[3]*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИОНИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ХИМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ В МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Проведено сравнение метода ионизации с использованием излучения лазерной плазмы и химической ионизации в масс-спектрометрическом анализе при атмосферном давлении. Преимущества метода ионизации лазерной плазмой продемонстрированы на примере исследования твердых органических соединений.

A.I. SIDOROV[1,2], A.B. BUKHARINA[1], A.V. PENTO[1],
R.S. ABLIZEN[1], S.M. NIKIFOROV[1], K.Yu. KRAVETS[3]
[1]*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[3]*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow*

COMPARISON OF IONIZATION EFFICIENCY BY LASER PLASMA RADIATION AND CHEMICAL IONIZATION IN MASS SPECTROMETRY OF ORGANIC COMPOUNDS

A comparison is made of the ionization method with using laser plasma radiation and chemical ionization in mass spectrometric analysis at atmospheric pressure. The advantages of the laser plasma ionization method are demonstrated by the study of solid organic compounds.

В настоящее время одним из важных направлений развития лазерной масс-спектрометрии является разработка новых методов анализа веществ и материалов при атмосферном давлении без пробоподготовки. Отсутствие предварительной пробоподготовки позволяет сократить время анализа и максимально сохранить информацию об исходном химическом составе исследуемого объекта. Такие методы чрезвычайно актуальны в биологии и медицине для анализа состава и диагностики патологий в биологических тканях и жидкостях, в системах обеспечения безопасности

для определения в реальном времени присутствия наркотических и взрывчатых веществ, в фармакологии для идентификации лекарств.

В работе сравниваются два способа ионизации при атмосферном давлении: ионизация в коронном разряде, основанная на ионно-молекулярных реакциях (химическая ионизация) и новый метод масс-спектрометрического анализа биологических объектов без предварительной пробоподготовки в режиме реального времени [1]. В этом способе перевод исследуемого объекта в газовую фазу осуществляется посредством нагрева. Анализируемый образец затем ионизуется излучением лазерной плазмы. Метод позволяет анализировать газообразные и твёрдые органические объекты, в том числе лекарственные препараты и биологические ткани. Отсутствие предварительной пробоподготовки позволяет сократить время анализа и максимально сохранить информацию об исходном химическом составе исследуемого объекта

Эффективность нового способа продемонстрирована на анализе твердых органических соединений, в роли которых выступали кофеин, флуоренол, антрацен, лидокаин, тофизопам. Сравнение проводилось по отношению детектированных ионов к массе внесенного вещества. В результате было получено, что чувствительность метода ионизации с использованием лазерной плазмы в ряде веществ лучше, чем при химической ионизации.

Список литературы

1. Pento A.V., Nikiforov S.M., Simanovsky Ya.O., Grechnikov A.A., Alimpiev S.S. Laser ablation and ionisation by laser plasma radiation in the atmospheric-pressure mass spectrometry of organic compounds // Quantum Electronics. 2013. V. 43. № 1. P. 55-59.

УДК 535(06)+004(06)

Г.Т. МАСЛОВА, А.П. ЗАЖОГИН, А.С. МАВРИЧЕВ[1],
Л.А. ДЕРЖАВЕЦ[1], А.С. ТРУБЕЦКАЯ, А.В. ТИТОВА
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[1]*РНПЦ онкологии и медицинской радиологии, Минск, Беларусь*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ОПУХОЛЕЙ МОЗГА (АСТРОЦИТОМА)

Оценены возможности использования лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии с возбуждением спектров сдвоенными лазерными импульсами фаций плазмы крови человека для изучения локального пространственного распределения кальция в качестве дополнительной информации при постановке и уточнению диагноза. Разработанные методики позволяют контролировать назначенное лечение и уточнять динамику развития онкопатологии.

G.T. MASLOVA, A.P. ZAJOGIN, A.S. MAVRICHEV[1],
L.A. DERZHAVETS[1], A.S. TRUBETSKAYA, A.V. TITOVA
Belarusian State University, Minsk, Belarus
[1]*RRPC of Oncology and Medical Radiology, Minsk, Belarus*

APPLICATION OF LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY THE DRIED DROPS OF BLOOD PLASMA IN THE DIAGNOSIS OF BRAIN TUMORS (ASTROCYTOMA)

The possibilities of using laser atomic emission multi-channel spectrometry with excitation of spectra by double laser pulses of human blood plasma facies to study the local spatial distribution of calcium as additional information in the formulation and refinement of the diagnosis are evaluated. The developed methods allow to control the prescribed treatment and to specify the dynamics of oncopathology.

В механизме патогенеза раковых новообразований главнейшим звеном следует считать нарушение порядка самоорганизации белка на клеточном уровне. В настоящее время в клинической практике используют около двух десятков онкомаркеров (ОМ), обладающих достаточной диагностической значимостью, в тоже время неизвестно ни одного ОМ, соответствующего идеальным параметрам. Для получения однозначного результата требуется тщательное сравнение многочисленных показателей.

Для оценки локального пространственного распределения макро- и микроэлементов в каплях экспериментально с помощью лазерной многоканальной спектрометрии исследованы образцы высушенных капель крови. Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазерное излучение фокусируется на образец фации плазмы крови с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Диаметр фации примерно 6 мм. Точки взяты через 0,6 мм. Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении.

На рис. 1, в качестве примера, представлены зависимости интенсивности линии кальция в спектрах плазмы пациентов с диагнозом ОГМ (1, 2) и донора (Зд). 1 – гемистоцитарная астроцитома G2 левой лобной доли ГМ; 2 – диффузная астроцитома GII левой островковой доли с распространением на лобную и височную доли ГМ.

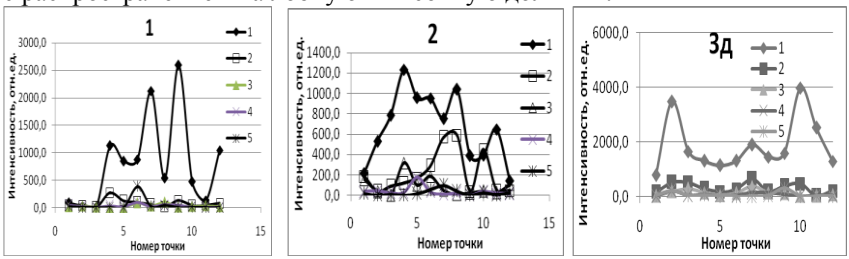


Рис. 1. Интенсивность линии Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях)

Для здорового человека (Зд) характерно распределение кальция по поверхности высохшей капли с максимальной концентрацией в краевом белковом валике благодаря равномерной диффузии раствора к краям в процессе испарения. При сравнении графиков 1 и 2 видно, что для пациента 2, у которого более сложная патология, заболевание сопровождается более существенным изменением связывающей способности альбумина и других белков, что приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция как по центру, так и в более глубоких слоях.

Полученная оперативная информация позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение. Всесторонняя аналитическая информация при обсуждении диагноза будет способствовать более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов и более успешному лечению опухолей головного мозга.

УДК 535(06)+004(06)

Т.А. ПРОКОПЕНКО[1], Н.И. НЕЧИПУРЕНКО[1],
И.Д. ПАШКОВСКАЯ[1], А.П. ЗАЖОГИН, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[1]*РНПЦ онкологии и медицинской радиологии, Минск, Беларусь*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ПАЦИЕНТОВ С ЦЕРЕБРОВАСКУЛЯРНОЙ ПАТОЛОГИЕЙ

Оценены возможности использования лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии с возбуждением спектров сдвоенными лазерными импульсами фаций плазмы крови человека для изучения локального пространственного распределения кальция в качестве дополнительной информации при постановке и уточнению диагноза. Разработанные методики позволяют контролировать назначенное лечение и уточнять динамику развития заболеваний головного мозга.

T.A. PROKOPENKO, N.I. NECHIPURENKO,
I.D. PASHKOVSKAYA, A.P. ZAJOGIN, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State University, Minsk, Belarus
[1]*RRPC of Oncology and Medical Radiology, Minsk, Belarus*

APPLICATION OF LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY OF DRIED BLOOD PLASMA DROPLETS IN THE DIAGNOSIS OF PATIENTS WITH CEREBROVASCULAR PATHOLOGY

The possibilities of using laser atomic emission multi-channel spectrometry with excitation of spectra by double laser pulses of human blood plasma facies to study the local spatial distribution of calcium as additional information in the formulation and refinement of the diagnosis are evaluated. The developed methods allow to control the prescribed treatment and to specify the dynamics of development of diseases of a brain.

Цереброваскулярные заболевания (ЦВЗ) одна из наиболее актуальных проблем современной медицины. В последние годы в структуре ЦВЗ из хронических форм нарушения мозгового кровообращения преобладает дисциркуляторная энцефалопатия (ДЭ). Транзиторная ишемическая атака (ТИА) существенно повышает риск развития повторного нарушения мозгового кровообращения – ТИА и ишемического инсульта.

Для оценки локального пространственного распределения макро- и микроэлементов с помощью лазерной многоканальной спектрометрии исследованы образцы высушенных капель плазмы крови. Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазерное излучение фокусируется на образец фации плазмы крови с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Диаметр фации примерно 6 мм. Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. На рис. 1, в качестве примера, представлены зависимости интенсивности линий кальция в спектрах высушенных капель плазмы пациентов с диагнозом ДЭ (Б) и донора (Зд).

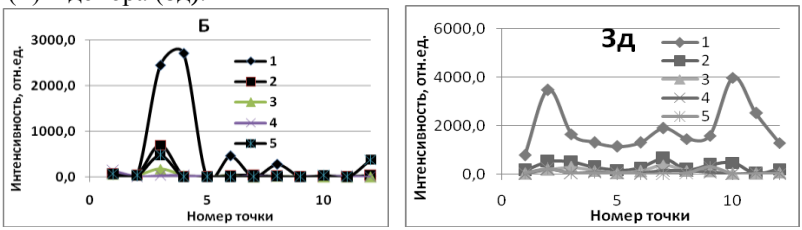


Рис. 1. Интенсивность линии Ca II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях)

Для здорового человека (Зд) характерно распределение кальция по поверхности высохшей капли с максимальной концентрацией в краевом белковом валике благодаря равномерной диффузии раствора альбумина к краям в процессе испарения. При патологии изменение связывающей способности альбумина и других белков приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция по центру и в более глубоких слоях. Наблюдаемые изменения пространственного распределения кальция могут быть фармакологическим ответом на воздействие назначаемых в процессе лечения процедур и определять эффективность терапевтического лечения после нейрохирургического вмешательства. Это, по-видимому, свидетельствует о медленно прогрессирующем ишемическом поражении головного мозга.

Полученная оперативная информация позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение. Всесторонняя аналитическая информация при обсуждении диагноза будет способствовать более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов и более успешному лечению цереброваскулярных заболеваний головного мозга.

УДК 535(06)+004(06)

Н.А. ОРЕХОВА[1], А.А. МАРТЫНОВА[1], А.М. ГУРИНА[1],
А.П. ЗАЖОГИН, М.Б. ШУНДАЛОВ
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[1]Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА КАМЕННОЙ ЧАСТИ МЕТЕОРИТА БРАГИН МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Исследован минеральный состав каменной части фрагмента метеорита Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии. Установлено, что на глубине порядка 1 - 3 мм находится осколок кальций содержащего оливина, не отмеченного в ранее проведенных многочисленных исследованиях состава метеорита.

N.A. OREKHOVA[1], A.A. MARTYNOVA[1], A.M. GURINA[1],
A.P. ZAJOGIN, M.B. SHUNDALOV
Belarusian State University, Minsk, Belarus
[1]Secondary School № 64, Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF THE MINERAL COMPOSITION OF THE STONE PART OF THE BRAGIN METEORITE BY LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY

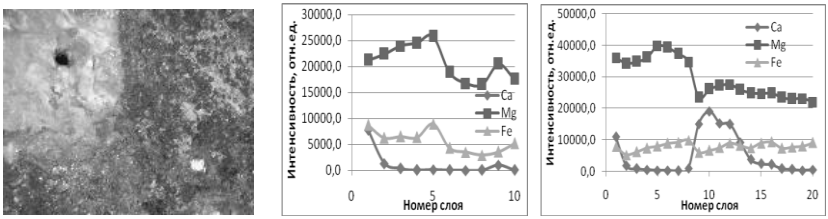
The mineral composition of the stone part of the Bragin meteorite fragment was studied by laser atomic emission spectrometry. It was found that at a depth of about 1 - 3 mm there is a fragment of calcium containing olivine, not noted in the previously conducted numerous studies of the composition of meteoriterate.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. И изучение любого метеорита расширяет наши знания в этом направлении [1-4]. В литературе отмечается, что метеорит Брагин, несмотря на то, что он изучается более 200 лет, до сих пор остается плохо изученным [1]. Самым распространенным минералами в метеорите Брагин являются оливины.

Целью настоящей работы являлось изучение минерального состава каменной части образца Брагинского метеорита. Оценку локального пространственного и объемного распределения элементов проводили

методом лазерной многоканальной спектрометрии, используя лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж.

На рис. 1*а* приведена фотография участка каменной части метеорита. Места воздействия серий сдвоенных лазерных импульсов – на белой части черная точка, и белая на черной части. На рис. 1*б* и 1*в* приведено послойное (20 имп. на слой) распределение Mg, Ca и Fe в указанных точках.



а *б* *в*

Рис. 1. Снимок каменной части метеорита (*а*), послойное распределение элементов в белой (*б*) и черной частях (*в*) образца

При сравнении графиков на рис. 1б и 1в видно существенное отличие их по распределению Ca. Можно сделать предположение, что в черной части на глубине от 9 слоя по 15 присутствует вкрапление нового минерала. При средней величине абляции за импульс порядка 10 - 15 мкм толщина образца минерала примерно 50 - 150 мкм. Для оценки размеров вкрапления проведен анализ содержания кальция по двум перпендикулярным направления. Примерный размер вкрапления 1 х 1,3 мм. Следует отметить, что даже в последней работе по наиболее подробному исследованию химического и минерального состава каменной части метеорита Брагин на наличие минерала содержащего вместе три указанных элемента не установлено [1]. По видимому, минерал относится к разновидности Ca-содержащих оливинов [4].

Список литературы

1. Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х. и др. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. Т. 160. Кн. 2. С. 324-338.

2. Buseek P.R. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. V. 41. No. 6. P. 711-740.

3. Лаврентьева З.А., Люль А.Ю., Колесов Г.М. // Геохимия. 2012. № 1. С. 38-47.

4. Иванов А.В., Ярошевский А.А., Иванова М.А. Минералы метеоритов – новый каталог // Геохимия. 2019. Т. 64. № 8. С. 869-932.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Д.А. ДОЛГУШКИН[1],
Л.Т. ВОЛОВА[1], В.А. ЛАЗАРЕВ[1], М.Д. МАРКОВА,
А.В. ЛОМКИНА

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва
[1]Самарский государственный медицинский университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СУСТАВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ХОНРОПЛАСТИКИ У КРОЛИКОВ

В работе представлены результаты расширенного анализа экспериментальных исследований образцов дистальных эпифизов бедренных костей кроликов с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Установлено, что значения коэффициентов характеризуются уменьшением пиков при переходе от зоны интактного хряща к области пластики ОТП на волновых числах 956 см$^{-1}$ (PO^{3-}_4 (Симметричные валентные колебания фосфата)), 1069 см-1 (CO_3^{2-}(C-O плоскостное валентное)) и относительно постоянными коэффициентами на волновых числах 852 см$^{-1}$ (Пролин), 1250 см$^{-1}$ (Амид III), 1587 см$^{-1}$ (Амид II) и 1660 см$^{-1}$ (Амид I), а также на 1745 см$^{-1}$ ((C=O) Липиды).

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, D.A. DOLGUSHKIN[1],
L.T. VOLOVA[1], V.A. LAZAREV[1], M.D. MARKOVA, A.V. LOMKINA

Samara National Research University
[1]Samara State Medical University

APPLICATION OF RAMAN SPECTROSCOPY TO ASSESS THE ARTICULAR SURFACE AFTER PERFORMING CHONDROPLASTY IN RABBITS

This paper presents the results of expanded analysis after the experimental researches with the samples femoral bones of rabbits in distal epiphysis area using the Raman spectroscopy method. It has been found that values of the ratios characterized by reduction of Raman bands during transition from the intact cartilage zone to the PFP plasty region on the wave numbers 956 cm $^{-1}$ (PO_3^{-4} (symmetric stretching phosphate oscillation)), 1069 cm^{-1} (CO_3^{2-}(C-O planar stretching vibration)) and relatively constant coefficients on the wavenumbers 852 cm^{-1} (Proline), 1250 cm^{-1} (Amid III), 1587 cm^{-1} (Amid II) и 1660 cm^{-1} (Amid I), and also on the 1745 cm^{-1} ((C=O) Lipids).

Одним из распространенных видов патологии является повреждение хрящевой ткани. Опасность заболеваний состоит в том, что оно плохо диагностируются на первоначальных этапах своего развития, в результате это приводит к деформации и разрушению ткани [1]. В последнее время в разных областях хирургии широко используется обогащенная тромбоцитами аутоплазма [2]. Оценку эффективности хондропластики с применением ОТП можно выполнить, применив спектроскопию комбинационного рассеяния (СКР) для анализа поверхности макропрепаратов.

Материалом для исследования послужили образцы дистальных эпифизов бедренных костей кроликов породы «Шиншилла», у которых была проведена пластика двумя способами – обогащенной тромбоцитами плазмой и ее комбинацией с костью. Животных выводили из эксперимента через 2 недели и 1, 2, 3 месяца после проведения операции. Выполняли биопсию дистальных эпифизов бедренных костей.

Поверхности регенератов исследовали с помощью экспериментального стенда [3], реализующего метод СКР. Обработка полученных спектров КР была выполнена в программе Wolfram Mathematica.

В результате исследования проведен компонентный анализ образцов исследования с помощью деконволюции спектров. Установлено, что процесс разрушения хряща сопровождается снижением интенсивности 956 см$^{-1}$ (ν1 PO_4^{3-}), 1002 см$^{-1}$ (ν (C–C) Фенилаланин), 1069 см$^{-1}$ ((s) симметричное растяжение CO_3^{2-}). Лечение дефектов обогащенной тромбоцитами плазмой или обогащенной тромбоцитами плазмой в комбинации ее с костью позволяет постепенно восстанавливать хрящевую ткань в зоне дефекта. Показана эффективность метода лечения хрящевой деструкции обогащенной тромбоцитами плазмой в комбинации ее с костью. Спектроскопия комбинационного рассеяния может быть применена для оценки зон суставной поверхности после выполнения хондропластики и степени восстановления хряща.

Список литературы

1. Зуев-Ратников С.Д. Новый способ аутопластики суставных поверхностей при лечении больных с деструктивно-дистрофическими заболеваниями коленного сустава. 2015. С. 154.

2. Chang N.-J. et. al. Therapeutic effects of the addition of platelet-rich plasma to bioimplants and early rehabilitation exercise on articular cartilage repair. 2018. V. 46. P. 2232-2241.

3. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Taskina L.A., Volova L.T. et. al. // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. P. 153-157.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.В. ПИСАРЕВА,
Л.Т. ВОЛОВА[1], О.О. ФРОЛОВ, Я.В. ФЕДОРОВА,
А.Н. СУБАТОВИЧ

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва
[1]Самарский государственный медицинский университет

ХЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ОСТЕОПОРОЗЕ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

В работе приведены результаты хемометрического анализа костной ткани при остеопорозе с помощью спектроскопии комбинационного рассеивания. Объектами исследования являлись образцы бедренных костей, в которых при помощи овариоэктомии был смоделирован остеопороз. В ходе измерений были выявлены основные линии комбинационного рассеяния, отражающие компоненты органического матрикса и минеральной структуры костных материалов. После расширенного спектрального и хемометрического анализа биоматериалов были выявлены основные различия количественного компонентного состава губчатой и кортикальной костной ткани при остеопорозе.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA[1],
E.V. PISAREVA, O.O. FROLOV, Ya.V. FEDOROVA,
A.N. SUBATOVICH

Samara National Research University
[1]Samara State Medical University

CHEMOMETRIC ANALYSIS OF BONE TISSUE AT OSTEOPOROSIS BY RAMAN SPECTROSCOPY

The work shows the results of chemometric analysis of bone tissue at osteoporosis by Raman spectroscopy. The subjects of the study were samples of femur where osteoporosis was modeled by ovarioectomy. The measurements revealed basic lines of Raman spectroscopy reflecting the components of the organic matrix and mineral structure of bone materials. After extended spectral and chemometric analysis of biomaterials, the main differences in the quantitative component composition of spongy and cortical bone tissue were revealed in osteoporosis.

Остеопороз – это хроническое прогрессирующее заболевание скелета. Для него характерны микроструктурные повреждения и системные потери костной ткани, которые приводят к чрезмерной хрупкости кости и

опасности остеопоротических переломов. Трудности при диагностике остеопороза вызываются системным и единовременным характером поражения органического матрикса и минеральной составляющей, а также скрытным протеканием болезни [1-2]. В качестве метода исследований костной ткани при остеопрозе был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния.

Объектами исследования являлись образцы бедренных костей крыс. Моделирование остеопороза у животных было осуществлено путём проведения овариоэктомии. Были исследованы кортикальные и губчатые ткани в разных областях кости.

Спектральные характеристики костей были исследованы с помощью экспериментального стенда, состоящего из диодного лазера LML-785.0RB-04, оптического рамановского модуля PBL-785, спектрометра Sharmrock SR-303i, цифровой охлаждаемой камеры ANDOR DV-420A-OE и компьютера. Использование данного спектрометра обеспечивает разрешение 0,15 нм (1 см$^{-1}$) и низкий уровень шумов. Регистрация спектров осуществлялась в интервале от 400 см$^{-1}$ до 2000 см$^{-1}$, так как данный спектральный диапазон характеризуется относительно большой глубиной проникновения излучения [3].

В результате работы были выявлены основные линии комбинационного рассеяния, отражающие компоненты органического матрикса и минеральной структуры костных биоматериалов: 1570 см$^{-1}$, 816 и 1411 см$^{-1}$, 1125 см$^{-1}$, 1445 и 1739 см$^{-1}$, 957 см$^{-1}$, 1038 см$^{-1}$, 1165 см$^{-1}$, 1205 и 1600 см$^{-1}$, 1300 см$^{-1}$. При использовании расширенного спектрального и хемометрического анализа биоматериалов выявлены основные различия количественного компонентного состава губчатой и кортикальной костной ткани при остеопорозе. Можно сделать вывод, что оптический метод позволяет определить наиболее значимые критерии для оценки относительной концентрации компонентов костной ткани при остеопорозе и оценить эффективность коррекции с помощью аллогенного гидроксиапатита различных концентраций.

Список литературы

1. Kiratli B.J., Smith A.E., Nauenberg T. et. al Bone mineral and geometric changes through the femur with immobilization due to spinal cord injury // J. Rehabil. Res. Dev. 2000.V. 37. P. 225–233.

2. Jiang S.D., Shen C., Jiang L.S. et. al Differences of bone mass and bone structure in osteopenic rat models caused by spinal cord injury and ovariectomy // Osteoporos Int. 2007. V. 18. P. 743-750.

3. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Volova L.T., Dolgushkin D.A., Shalkovsky P.Y., Pershutkina S.V. Detailed spectral analysis of decellularized skin implants // Journal of Physics: Conference Series 2016. V. 737. P. 14.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. КРАСНИКОВ[1,2], А.Ю. СЕТЕЙКИН[1,2], Б. РОТ[3]
[1]*Амурский государственный университет, Благовещенск*
[2]*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*
[3]*Университет Лейбница, Ганновер, Германия*

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ТКАНЯМИ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Моделирование методом Монте-Карло (МК) распространения света в рассеивающих и поглощающих средах уже много лет является золотым стандартом для изучения взаимодействия света с биологическими тканями и использовалось в самых разных случаях. Взаимодействие фотонов со средой моделируется на основе ее оптических свойств и исходного приближения фазовой функции рассеяния. За последнее десятилетие с помощью изобретения новых методов измерений и анализа были также разработаны соответствующие сложные методы для описания лежащих в основе взаимодействия света с биотканью учитывающие параметры среды и условия эксперимента.

I.V. KRASNIKOV[1,2], A.Yu. SETEIKIN[1,2], B. ROTH[3]
[1]*Amur State University, Blagoveshchensk*
[2]*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*
[3]*Leibniz University, Hannover, Germany*

MODERN APPROACHES IN MODELING INTERACTIONS OF OPTICAL RADIATION WITH TISSUES

Monte Carlo (MC) simulation for light propagation in scattering and absorbing media is the gold standard for studying the interaction of light with biological tis-sue and has been used for years in a wide variety of cases. The interaction of pho-tons with the medium is simulated based on its optical properties and the original approximation of the scattering phase function. Over the past decade, with the new measurement geometries and recording techniques invented also the corresponding sophisticated methods for the description of the underlying light-tissue interaction taking into account realistic parameters and settings were developed.

От оптической визуализации теперь можно ожидать такого же прорыва в области неоперативных диагностических методов, который был обеспечен рентгеновской и компьютерной томографией в то время, благодаря использованию неионизирующего излучения и его неинвазивности [1]. Спектроскопия диффузного отражения (DRS),

спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (NIRS), дифракционная оптическая томография (DOT), рамановская томография, флуоресцентная томография, оптическая микроскопия, оптическая когерентная томография (OCT) и фотоакустическая (PA) визуализация являются одними из широко используемых в современности оптических методов в биомедицине, и их потенциал далеко не полностью изучен [2].

Моделирование распространения света в среде основано на характеристиках поглощения и рассеяния, которые доминируют при распространении света в биологических тканях. Обычный подход к моделированию распространения света в среде состоит в использовании уравнения переноса излучения (RTE). Эффективные решения или приближения этого уравнения для гетерогенной среды (ткани) все еще остаются открытым вопросом [3].

Основанное на методе МК моделирование распространения света в биологической ткани стало важным инструментом для понимания тонкостей взаимодействия света с веществом в сложных средах. Помимо эффективных алгоритмов, приближения лежащие в основе модели являются ключом к последним достижениям в этой области. В настоящее время проводится интенсивный повторный поиск для разработки более комплексных и в то же время эффективных инструментов моделирования, учитывающих все аспекты самой системы, а также учитывающих все соответствующие воздействия окружающей среды [3]. Кроме того, тенденция указывает на использование анатомически более реалистичных геометрий и развитие более удобных инструментов моделирования. Дальнейшее развитие биофотоники лежит в постоянно увеличивающейся вычислительной мощности вычислительных систем и концепций искусственного интеллекта, таких как концепции машинного обучения, глубокого обучения и анализа данных.

Список литературы

1. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. Т. 1.
2. Yun S.H., Kwok S.J. // Nature Biomed. Eng. 2017. V. 1.
3. Krasnikov I., Seteikin A., Roth B. // Biomedical Engineering Letters. 2019. V. 9(3). P. 327.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ОНИКИЕНКО, А.Ф. РЫБАСЬ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРИИ

Выполнен анализ поляризационной картины света, прошедшего через ряд биологических тканей (срезы щитовидной железы и препараты крови человека). Обнаружено соответствие поляризационной картины структуре исследуемого образца. Выявлена способность эритроцитов проявлять свойства одноосных кристаллов.

E.V. ONIKIENKO, A.F. RUBASS
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

INVESTIGATION OF BIOLOGICAL TISSUES BY STOKES POLARIMETRY METHOD

The polarization analysis of light passed through a number of biological tissues (human thyroid tissue and human blood samples) has been done. The correspondence of the polarization picture to the tissue structure has been revealed. The ability of erythrocytes to demonstrate the uniaxial crystal properties has been discovered.

Одной из актуальных проблем современной медицины является риск врачебной ошибки при постановке диагноза. Решение этой проблемы сводится к поиску комплекса автоматизированных диагностических методов исследования, характеризующихся высокой точностью и скоростью обработки результатов. Работа посвящена исследованию особенностей взаимодействия сингулярных пучков с различными микрообъектами на примере здоровых и патологических тканей организма человека. Для качественной и количественной оценки поляризационной структуры сингулярного пучка было использовано «Устройство для определения и исследования распределения поляризации» [1, 2].

При исследовании картины поляризации света, прошедшего через фиксированные препараты ткани щитовидной железы, были обнаружены закономерности распределения эллиптичности и поляризации для различных структур и сред образцов. При прохождении лазерного пучка через препарат щитовидной железы, содержащий кальцинаты, возникают поляризационные сингулярности (С-точки). Кальцинаты способны вращать плоскость поляризации света, что подтверждается данными

поляризационной микроскопии, и ведут себя, как анизотропные кристаллы.

При поляризационном исследовании тканей щитовидной железы было обнаружено локальное изменение линейной поляризации светового пучка на круговую, причиной которого послужило наличие эритроцитов в исследуемой области (капля крови на образце щитовидной железы). Методом Стокс-поляриметрии были исследованы образцы крови (рис. 1). Для одиночных эритроцитов можно наблюдать четкий переход эллиптичности поляризации (смена белого и черного тонов). На эритроцитах происходит изменение линейной поляризации света на циркулярную, при этом центр клетки не проявляет изменения поляризации исходного пучка. В случае расфокусировки пучка эритроцит обнаруживает характерную картину распределения интенсивности и поляризации света: вокруг клетки возникает система концентрических колец с ортогональными состояниями поляризации на соседних кольцах (рис. 2), поле пучка ведет себя аналогично полю сингулярных пучков в одноосном кристалле [3].

Метод Стокс-поляриметрии позволяет быстро и точно выявлять закономерности распределения эллиптичности и поляризации света, прошедшего через структуры и среды различных биологических тканей.

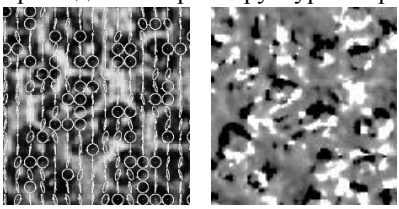


Рис. 1. Поляризационная картина (слева) и распределение эллиптичности (справа) эритроцитов человека

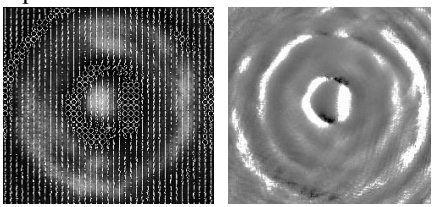


Рис. 2. Поляризационная картина (слева) и распределение эллиптичности (справа) эритроцита при расфокусировке пучка

Список литературы

1. Рыбась А.Ф., Ибрагимов А.Э. Программа расчета параметров поляризации и визуализации состояния поляризации в реальном времени. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661237. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06.10.2017 г.

2. Рыбась А.Ф. Погребная А.О. Устройство для определения и исследования распределения поляризации. Патент на полезную модель №168752. Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 17.02.2017 г.

3. Воляр А.В., Егоров Ю.А., Рыбась А.Ф., Фадеева Т.А. Тонкая структура оптических вихрей в кристалле: монохроматический сингулярный пучок // Журнал Технической Физики. 2004. Т. 74. № 12. С. 90-93.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, М.А. ЗЫБИН[1],
К.Б. ЧЕРНЫЙ-ТКАЧ, О.О. ФРОЛОВ, М.А. ИВЛИЕВ[1],
Г.Г. ДОЛГУШОВ[1]

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва
[1]Стоматологическая клиника «ДИАМАНТ», Самара

ХЕМОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ТКАНЕЙ ЗУБОВ ПРИ ПЕРИОДОНТИТЕ

Проанализированы спектры комбинационного рассеяния тканей зубов с периодонтитом. Проведен хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния твердых тканей зубов у здоровых пациентов и больных периодонтитом. Установлены основные спектральные особенности тканей зубов при периодонтите, что в дальнейшем позволит разработать новые способы его раннего обнаружения.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, M.A. ZYBIN[1],
K.B. CHERNYY-TKACH[1], O.O. FROLOV, M.A. IVLIEV[1],
G.G. DOLGUSHOV[1]

Samara National Research University
[1]Dental Clinic «Diamant», Samara

CHEMOMETRIC ANALYSIS OF RAMAN SPECTRA OF DENTAL TISSUES DURING PERIODONTITIS

The Raman spectra of tooth tissues with periodontitis were analyzed. A chemometric analysis of the Raman spectra of dental hard tissues in healthy patients and patients with periodontitis was performed. The main spectral features of tooth tissues in periodontitis have been established, it will subsequently allow the development of new methods for its early detection.

Периодонтит является распространенным стоматологическим заболеванием, развитие которого может привести к потере зубов. Патологический процесс, протекающий в одной из тканей зубочелюстной системы, может также распространяться и на соседние ткани, вызывая изменения их структуры и состава [1]. В связи с этим изучение спектральных особенностей твердых тканей зуба у больных с периодонтитом является интересной и важной задачей для стоматологии и медицины.

В качестве материалов исследования были взяты образцы твердых тканей зубов, взятых с различных участков зубов: дентин на срезе, дентин корня на срезе, цемент оголенный, цемент под 3десной, эмаль. Зубы были получены после удаления зубов у двух групп людей: пациентов с периодонтитом (1) и здоровой контрольной группы (2) (зубы, удаленные по ортодонтическим показаниям).

Спектральные характеристики твердых тканей зубов были исследованы с помощью экспериментального стенда, реализующего метод спектроскопии комбинационного рассеяния, состоящего из волоконно-оптического зонда для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB-785, лазерного модуля LuxxMaster Raman Boxx (λ=785 нм), цифрового спектрометра высокого разрешения Andor Shamrock sr303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE.

Обработка спектров КР осуществлялась в программе Wolfram Mathematica 8. С помощью итерационного алгоритма на интервале 800-2100 см$^{-1}$ определялась аппроксимирующая линия (полином пятой степени) автофлуоресцентной составляющей, которую затем вычитали для получения КР спектра на фоне автофлуоресценции. Полученные спектры КР очищались от шумов сглаживающим медианным фильтром (5 точек).

Далее для более детального анализа спектров был проведен хемометрический анализ полученных данных с помощью метода главных компонент (PCA). Данный метод реализован в программной среде The Unscrambler X. Используемый алгоритм для PCA описан в работе [2].

В результате проведенных исследований был выполнен хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния твердых тканей зубов у здоровых пациентов и больных периодонтитом. В результате исследования были выявлены спектральные изменения твердых тканей зубов у больных периодонтитом, которые проявляются на линиях 937, 956, 1069, 1230-1270, 1555, 1665 и 1739 см$^{-1}$. Данные изменения свидетельствуют о разрушении твердых тканей зуба: коллагеновых матриксов и солей гидроксиапатита.

Список литературы

1. Amro S., Othman H., Al Zahrani M., Elias W. Microanalysis of root cementum in patients with rapidly progressive periodontitis // OHDM. 2016. V. 15. No. 5.

2. Multivariate calibration /ed. by Martens &Næs. Wiley, 1991.

УДК 535(06)+004(06)

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, М.А. ЗЫБИН[2],
Л.Т. ВОЛОВА[1], О.О. ФРОЛОВ, Г.Г. ДОЛГУШОВ[2]
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва
[1]Самарский государственный медицинский университет
[2]Стоматологическая клиника «ДИАМАНТ», Самара

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕНТИННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты сравнительной спектральной оценки околопульпарного и плащевого дентина для анализа возможности их дальнейшего использования при изготовлении дентинных материалов для костной регенерации при имплантации зубов. Исследования проведены с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Показано, что материалы из околопульпарного и плащевого дентина имеют схожий спектральный состав и могут быть в дальнейшем использованы при изготовлении биоматериалов для костной пластики.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, M.A. ZYBIN[2],
L.T. VOLOVA[1], O.O. FROLOV, G.G. DOLGUSHOV[2]
Samara National Research University
[1]Samara State Medical University
[2]Dental Clinic «Diamant», Samara

SPECTRAL ANALYSIS OF DENTINE MATERIALS

The results of a comparative spectral evaluation of peri-pulp and cloak dentin are given in the analysis of the possibility of their further use in the manufacture of dentinal materials for bone regeneration during dental implantation. The studies were performed using Raman spectroscopy. It is shown that materials from near-pulp and cloak dentin have a similar spectral composition and can be further used in the manufacture of biomaterials for bone grafting.

Появление новых биоматериалов оказывает значительное влияние на развитие регенеративной медицины и улучшение качества жизни пациентов. Для регенерации требуются биоматериалы, обеспечивающие формирование собственной костной ткани организма и замещаемые ею, то есть способные к абсорбции. Материалы, не обладающие такими свойствами, не могут быть замещены костной тканью и, таким образом, могут стать источниками постоянного воспаления, так как воспринимаются организмом как инородное тело [1].

Удалённые у человека зубы (по ортодонтическим показаниям) обычно утилизируются, согласно отходам класса Б. Однако дентин может быть также использован в регенерации костной ткани и имеет остеокондуктивные свойства.

При производстве данного биоматериала необходимо выбрать подходящий способ его изготовления, что является актуальной задачей. Оптические методы контроля биоматериала имеют достаточно возможностей в успешном решении данной проблемы, благодаря, неинвазивности и оперативности [2].

В качестве объекта исследования были взяты 16 дентинных материалов различных размеров, с зубов, удаленных по причине периодонтита. Все образцы были разделены на две группы: группа – дентинный материал со вовлечением околопульпарного дентина и группа лишенная околопульпарного дентина, состоящая только из плащевого дентина.

Исследования проведены с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния, реализованного экспериментальным стендом, состоящим из рамановского пробника RPB-785, совмещенного с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны 784,7 ± 0,05 нм) и высокоразрешающего цифрового спектрометра Shamrock sr-303i, обеспечивающего спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE.

Установлено, что незначительные различия между исследуемыми дентинными материалами проявляются в линиях комбинационного рассеяния 850 $см^{-1}$ (пролин), 956 $см^{-1}$ (PO_4^{3-} (ν_1), гидроксиапатит) и 1738 $см^{-1}$ (фосфолипиды), что обусловлено разной степенью минерализации и структурой волокнистого компонента дентина.

Проведенный детальный анализ линий с помощью деконволюции функции Гаусса и методом главных компонент позволил установить, что статистически значимых отличий между исследуемыми группами образцов не выявлено. Таким образом, разрабатываемый оптический метод для оценки биоматериалов из дентина по значениям спектральных соотношений может быть использован для оптимизации процесса и выбора индивидуализации его параметров обработки.

Список литературы

1. Murata M., Akazawa T., Mitsugi M., Um I.-W., Kim K.-W., Kim Y.-K. Human dentin as novel biomaterial for bone regeneration // 2011, 10.5772/25071.

2. Soares L.E.S., Campos A.D.F., Martin A.A. Human and bovine dentin composition and its hybridization mechanism assessed by FT-Raman spectroscopy. 2013. 210671.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. ГЕРАСИМЕНКО, А.А. ПОПОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЛАЗЕРНО-АБЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ОБЛАДАЮЩИХ РЕЗОНАСАМИ МИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ, ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Приведены результаты экспериментов по получению коллоидных растворов сферических кремниевых наночастиц с размером 20 – 300 нм методом фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации в воде. Показано, что такие наночастицы обладают резонансными оптическими свойствами в видимом диапазоне (Ми-резонансы), а спектральное положение резонансного отклика можно контролировать с помощью изменения параметров лазерного синтеза и дополнительной пост-обработки растворов центрифугированием. Полученные наночастицы перспективны для ультрачувствительного контроля в биомедицине и множестве других сфер.

A.V. GERASIMENKO, A.A. POPOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LASER-ABLATIVE SYNTHESIS OF SILICON NANOPARTICLES HAVING MIE RESONANCES IN THE VISIBLE RANGE FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

We report on the synthesis of colloidal solutions of 20 - 300 nm spherical silicon nanoparticles (Si NPs) using methods of femtosecond laser ablation in water. We demonstrate a resonant optical response (Mie-resonance) of our Si NPs in the visible range, while the precise spectral position of the resonance peak could be tuned by laser fabrication parameters and an additional centrifugation step. The synthesized Si NPs are promising for ultrasensitive control in biomedicine and other areas.

Раннее обнаружение молекулярных маркеров различных заболеваний, а также патогенных бактерий и вирусов является очень актуальной задачей в биомедицине. Одним из наиболее перспективных методов ранней диагностики является спектроскопия Рамановского (комбинационного) рассеяния. Этот метод позволяет определить уникальный «портрет» химических связей различных молекулярных соединений [1]. Однако, широкое распространение методов Рамановской диагностики ограничено крайне низкой эффективность этого процесса –

типичная интенсивность рамановского сигнала составляет не более 0,001 % интенсивности упавшего на молекулу света. В этой работе мы впервые рассматриваем возможность лазерного синтеза коллоидных растворов диэлектрических (полупроводниковых) наночастиц с контролируемыми оптическими свойствами [2] для резонансного усиления рамановского сигнала. Наш подход основан на фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации кристаллической кремниевой пластинки в воде [3, 4].

Целью работы является изучение методов лазерно-абляционного синтеза кремниевых наночастиц с контролируемым спектральным положением пика резонансного оптического отклика. Растворы кремниевых наночастиц были синтезированы методом фемтосекундной лазерной абляции монокристаллической кремниевой пластины в воде. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Параметры эксперимента: длина волны лазера - 1030 нм, длительность импульсов - 270 фс, энергия импульсов - 100 мкДж, частота повторения - 10 кГц, длительность эксперимента - 15 мин). Затем полученные коллоидные растворы центрифугировались с различными скоростями (величины относительного центростремительного ускорения 1000-15000 g), после чего супернатант удалялся, а осадок редиспергировался в деионизованной воде. В результате удалось получить коллоидные растворы кремниевых НЧ со средними диаметрами от 100 до 150 нм и узкими размерными распределениями. Синтезированные НЧ демонстрировали сильный резонансный оптический отклик с положением пика, зависящим от размера наночастиц.

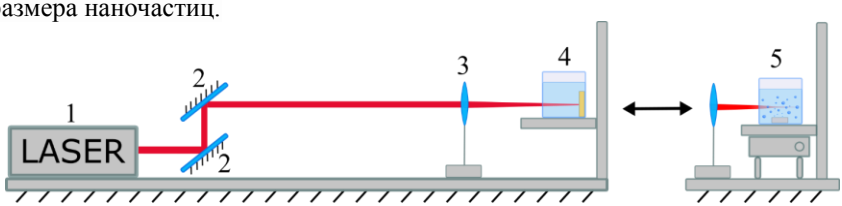


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - лазер, 2 - зеркала, 3 - фокусирующая линза, 4, 5 - кюветы с мишенью

Список литературы

1. Cooper K., et. al. // Journal of Biophotonics. 2018. V. 11(7).
2. Rodriguez I., et. al. // Nanoscale. 2014. V. 6(11). P. 5666-5670.
3. Kuzmin P.G., et al. // The Journal of Physical Chemistry C. 2010. V. 114(36). P. 15266-15273.
4. Blandin P., et. al. // Journal of Materials Chemistry B. 2013. V. 1(19). P. 2489.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. КРЮЧКОВ, А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ,
Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.М. САГИТОВА
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛ CO_2 С ПОМОЩЬЮ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ СО ЛАЗЕРА

Экспериментально исследовано поглощение широкополосного излучения суммарных частот СО лазера молекулами CO_2 в смеси с азотом при суммарном давлении 1 атмосфера. Поглощение измерялось в районе длины волны 2.7 мкм. Показано, что широкополосное излучение суммарных частот СО лазера может применяться для измерения как концентрации так и профиля линии поглощения молекул CO_2.

D.S. KRYUCHKOV, A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY,
Yu.M. KLIMACHEV, A.M. SAGITOVA
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FEMTOSECOND LASER FABRICATION OF LINEAR GRAPHITIZED MICROSTRUCTURES IN A BULK OF POLYCARBONATE SAMPLES BY ULTRASHORT LASER PULSES

The absorption of CO_2 molecules mixed with nitrogen at a total pressure of 1 atmosphere was experimentally studied with broadband radiation of CO laser sum frequency generation. Absorption was measured in the wavelength region of 2.7 μm. It was shown that the broadband radiation of CO laser sum frequency generation can be used to measure both the concentration and the absorption line profile of CO_2 molecules.

Спектральная область, обозначаемая как средний ИК-диапазон (~ 500 – 5000 см$^{-1}$), содержит в себе как окна прозрачности атмосферы так уникальные наборы линий поглощения различных веществ. Поэтому для решения задач дистанционного газового анализа и зондирования атмосферы активно разрабатываются широкополосные лазерные системы среднего ИК-диапазона [1-3]. Одной из такой систем является неселективный СО лазер с широкополосным преобразованием частоты, который может охватить широкую область длин волн ~ 2 - 10 мкм [2, 3].

В текущей работе проведено экспериментальное исследование возможности применения широкополосного излучения суммарных частот

CO лазера для решения задач газового анализа. В эксперименте излучение суммарных частот пропускалось через газовую ячейку (длина 15 см), содержащую газовую смесь CO_2:N_2 = 0.3 : 0.7 при общем давлении 1 атмосфера. Спектр суммарных частот был оптимальным для получения максимальной мощности в районе длины волны 2.7 мкм. Были измерены спектры лазерного излучения до и после газовой ячейки; по отношению мощностей излучения определен коэффициент поглощения молекул CO_2, который был сравнен с рассчитанным по базе данных Hitran (рис. 1).

Получено удовлетворительное согласие между расчётным и экспериментальным профилем поглощения молекул CO_2. Отметим что пики поглощения в районе длин волн 2.703 мкм и 2.709 мкм не в эксперименте явно проявились, поскольку их максимумы попадают между полосами излучения суммарных частот. Таким образом, лазерная система базане неселективного CO лазера с широкополосным преобразованием частоты может применяться для дистанционного газового анализа методом дифференциального поглощения и в тоже время позволяет измерять профиль линии поглощения, то есть температуру и/или давление газов.

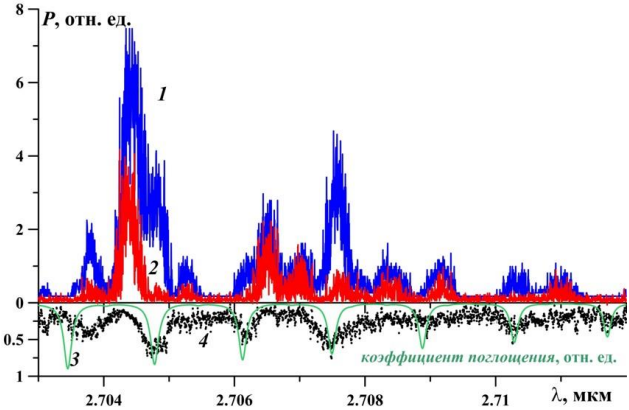


Рис. 1. Спектр излучения измеренный до (*1*) и после (*2*) газовой ячейки; рассчитанный (*3*) и измеренный (*4*) коэффициент поглощения молекул CO_2

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-32-00209).

Список литературы

1. Vasilyev S., Maskalev I.S. et. al. // Optica. 2019. V. 6 (1). P. 111.
2. Andreev Y.M., Ionin A.A. et. al. // Quantum Electron. 2013. V. 43 (2). P. 139.
3. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O. et. al. // Opt. Lett. 2018. V. 43 (13). P. 3184.

УДК 535(06)+004(06)

Н.М. ШАДРИН, М.Р. ЗАРИПОВ[1], А.И. КАЛУГИН[1],
Е.А. АНТОНОВ[1]
Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
[1]Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Предложена принципиальная схема системы, обеспечивающей измерение радиального растяжения лопаток турбин триангуляционным методом с точностью до 1 мкм. Представлены описание действия и состав разработанной системы.

N.M. SHADRIN, M.R. ZARIPOV[1], A.I. KALUGIN[1],
E.A. ANTONOV[1]
Kalashnikov Izhevsk State Technical University
[1]Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of the RAS, Izhevsk

LASER SYSTEM FOR REAL-TIME CONTROL OF RADIAL EXTENSION TURBINE BLADES

The principle diagram of system for measuring of radial extension of turbine blades by triangulation method with an accuracy of 1 micrometer is proposed. Description of system action and system composition are presented.

Научно-технический прогресс в таких ведущих отраслях экономики как авиакосмический и нефтегазовый комплексы требует применения изделий сложной формы с жесткими требованиями к точности их изготовления. Особо стоит выделить область авиационного двигателестроения, основой которого является производство газотурбинных двигателей (ГТД). Надежность данных двигателей напрямую зависит от надежности работы лопаток турбины, представляющих собой детали сложной формы.

Целью работы является разработка системы контроля радиальных растяжений лопаток турбин в режиме реального времени.

Измерение радиальных растяжений сводится к регистрации изменения расстояния до контролируемой поверхности лопатки от измерительной системы [1]. Устройства, действие которых основано на принципах импульсной или фазовой дальнометрии [2], интерферометрических методах [3] не способны обеспечить либо требуемую точность

(минимальную регистрируемую величину растягиваний до 1 мкм), либо скорость измерений (несколько десятков тысяч измерений в минуту при частоте оборотов турбины в несколько тысяч оборотов в минуту в зависимости от количества лопаток в турбине).

На рис. 1 представлен выбранный авторами триангуляционный метод. Данный метод основан на регистрации смещения светового пятна, формируемого неподвижным источником лазерного излучения, по перемещающейся контролируемой поверхности. Измерительная система состоит из двух основных частей: передающей, состоящей из лазерного диода и передающего объектива, формирующего коллимированный пучок лазерного излучения, и приемной, включающей в себя матричное ФПУ, регистрирующее смещение изображения Δx, соответствующее смещению контролируемой поверхности Δz, приемный объектив, формирующий изображение на ФПУ, и микроскоп, дополнительно повышающий точность измерений.

Учитывая, что современные матричные ФПУ имеют достаточно малые размеры пикселей (порядка нескольких микрометров) и высокое быстродействие (частота кадров может достигать нескольких тысяч кадров/с), мы можем рассматривать возможность применения данного метода для измерений с точностью до 1 мкм.

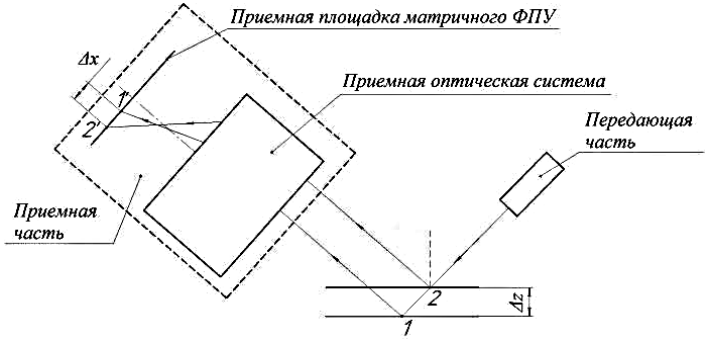


Рис. 1. Принципиальная схема лазерной системы контроля радиального растяжения лопаток турбин

Список литературы

1. Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение: Учебное пособие для вузов. М.: Академический Проект, 2008.

2. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б. Основы проектирования лазерных локационных систем: Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1983.

3. Иванов В.А., Привалов В.Е. Применение лазеров в приборах точной механики. СПб: Политехника, 1993.

УДК 535(06)+004(06)

П.С. КОПЬЕВ[1], О.С. КОМАРОВА, В.В. ЛЕНТОВСКИЙ, Д.Л. ФЕДОРОВ

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

[1]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

В работе представлены результаты разработки и исследования характеристик макетных образцов лазерной наногетероструктуры на основе GaAs/AlGaAs/InGaAs, раздельного ограничения с расширенным асимметричным волноводом и квантоворазмерной активной областью. Был получен мощный полупроводниковый лазер, работающий в одномодовом режиме.

P.S. KOP'EV[1], O.S. KOMAROVA, V.V. LENTOVSKII, D.L. FEDOROV

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

[1]Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

RESEARCH OF PROTOTYPE HIGH-POWER SEMICONDUCTOR LASERS

This article presents the results of the development and study of the prototype samples of a laser nanogeterostructure based on GaAs/AlGaAs/InGaAs structure with an expanded asymmetric waveguide and a quantum-well active region. A powerful single-mode semiconductor laser was obtained.

На основе уникальной конструкции асимметричного волновода из материала GaAs толщиной около 3 мкм, обеспечена лазерная генерация на нулевой моде. В качестве активной области использованы 2 квантовые ямы толщиной по 90 Å.

Выбрана конструкция активного элемента типа глубокая меза, которая надёжно ограничивает ток накачки от растекания в пассивные секции и предотвращает срыв лазерной генерации за счёт подавления замкнутых мод в резонаторе. Длина лазерного резонатора была увеличена до 3 мм вместе с увеличением просветления выходного зеркала до 5 %, что обеспечило улучшение отвода тепла от активной области лазера.

Были проведены исследования пороговых токов в лазерах с различной длиной резонатора и зеркалами, образованными естественными сколами

кристаллов. Измерялись величины пороговых токов и внешней дифференциальной эффективности на серии образцов. По зависимости плотности порогового тока лазера от обратной длины резонатора L, была рассчитана величина $J_{1/L=0}$ = 121 А/см^2, что соответствует отличному качеству наногетероструктуры.

Была исследована внешняя дифференциальной эффективности стимулированного излучения вблизи порога лазерной генерации. По графику зависимости обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности η_d от длины резонатора, получены значения внутреннего квантового выхода стимулированного излучения η_i = 98%, а величина внутренних оптических потерь α_i =0,71 см$^{-1}$.

На образцах с оптимальной длиной резонатора и нанесёнными просветляющим и высокоотражающим покрытиями на зеркала резонатора были исследованы ВтАХ и ВАХ, было получено, что лазеры на основе изготовленной наногетероструктуры способны выдавать максимальную мощность более 10 Вт в непрерывном режиме генерации и максимальный КПД около 58 % при токе накачки 5 А, что соответствует мощности 4 Вт.

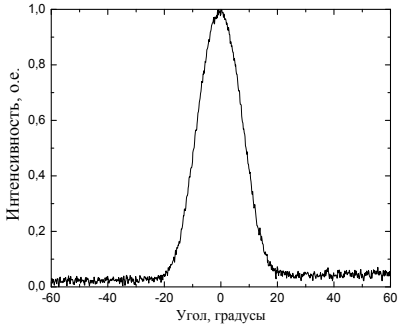


Рис. 1. Угловое распределение лазерного излучения в дальней зоне

На рис. 1 приведено угловое распределение лазерного излучения в дальней зоне в направлении, перпендикулярном *p-n* переходу. Эта зависимость соответствует нулевой моде лазерной генерации. Расходимость излучения в этом направлении определяется только толщиной волновода лазера.

Как видно из приведенных результатов, выбранный для конструирования лазера подход позволил получить в мощный полупроводниковый лазер, работающий в одномодовом режиме, при этом ширина спектра в диапазоне 1060 ± 20 нм на полувысоте не превышает 15 нм при всех режимах работы.

Список литературы

1. Слипченко С.О., Подоскин А.А. и др. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 10. С. 1431-1438.

2. Копьев П.С., Лентовский В.В. и др. // VII международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С.

УДК 535(06)+004(06)

С.Л. ШНЫРЕВ, А.А. ДОЛИН, М.А. РЫБАКОВ,
А.И. СУЛТАНГУЛОВА, А.А. КОНДРАШОВ,
А.А. КОЛЕСНИЧЕНКО
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДНОГО ЛАЗЕРА

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований представлена схема оптической измерительной системы для высокоточного и высокочувствительного детектирования H_2S в составе атмосферного воздуха.

S.L. SHNYREV, A.A. DOLIN, M.A. RYBAKOV,
A.I. SULTANGULOVA, A.A. KONDRASHOV,
A.A. KOLESNICHENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DEVELOPMENT OF METHOD FOR DETECTION OF SULFIDE HYDROGEN USING TUNABLE DIODE LASER ABSORPTION SPECTROSCOPY

Optical measuring system for high-sensitive H_2S detection using tunable diode laser absorption spectroscopy based on theoretical and experimental research was developed.

В настоящее время среди существующих методов детектирования сероводорода в атмосферном воздухе наиболее развивающимся и перспективным является метод, основанный на абсорбционной спектроскопии с использованием частотно-перестраиваемых полупроводниковых диодных лазеров (ПДЛ). Такой подход выгодно отличает возможность достижения высокой чувствительности детектирования, а также высокая точность проводимых измерений [1].

Разработка измерительной системы на основе использования ПДЛ предполагает решение задачи по определению оптимальных характеристик диодного лазера, в первую очередь – поиск наилучшего спектрального диапазона перестройки рабочих длин волн лазера. Это связано с наличием в атмосферном воздухе, помимо H_2S, других компонентов, таких как CO_2, H_2O и др. Колебательно-вращательные линии

поглощения данных газов во многих случаях перекрываются с линиями поглощения сероводорода, вследствие чего необходимо выбирать такие линии поглощения H_2S, которые не перекрываются с линиями поглощения остальных компонентов атмосферного воздуха.

Для решения данной задачи в лабораторных условиях был получен газовый образец, содержащий в своем составе сероводород. Для получения образца использовалась химическая реакция взаимодействия парафина и мелкодисперсного порошка серы с последующим разогревом приготовленной смеси.

Полученный газовый образец напускался в оптическую кювету, установленную в Фурье-спектрометр ФСМ-1202. Далее регистрировался спектр поглощения анализируемой смеси во всем рабочем диапазоне длин волн используемого спектрометра. По итогам расшифровки экспериментально полученных спектров поглощения данного образца были определены 4 наиболее перспективных спектральных диапазона для селективного и высокочувствительного детектирования сероводорода на основе метода TDLAS: 1000 - 1250, 2200 - 2300, 2400 - 2850, 4900 - 5350 см$^{-1}$.

При этом особый интерес при анализе полученных данных представлял спектральный диапазон вблизи 5000 см$^{-1}$. Это обусловлено возможностью использования фотодетекторов, а также источников лазерного излучения, не требующих сложного криогенного охлаждения в своем составе. Последующий более детальный анализ полосы поглощения 4900 - 5350 см$^{-1}$ [2] показал, что наиболее перспективным является частотный диапазон 5030 - 5050 см$^{-1}$.

Список литературы

1, Hodgkinson J., Tatam R.P. Optical gas sensing: a review // Measurement Science and Technology. 2012. V. 24(1). P. 012004.

2. http://hitran.iao.ru/.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ДЬЯЧЕНКО[1], В.Е. ПРИВАЛОВ, В.Г. ШЕМАНИН[1]
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]Новороссийский политехнический институт КубГТУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ЛИДАРОМ

Измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трёх длинах волн на разработанной лазерной системе и по измеренным сигналам ослабления лазерного излучения были рассчитаны значения среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента, по которым может быть восстановлена функция распределения аэрозольных частиц по размерам

V.V. DYACHENKO[1], V.E. PRIVALOV, V.G. SHEMANIN[1]
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
[1]Novorossiysk Polytechnic Institute of Kuban State Technological University

DETERMINATION OF THE ATMOSPHERIC AEROSOL DISPERSE COMPOSITION BY LIDAR

Laser radiation weakening signals have been measured by the developed aerosol lidar and the cement aerosol particles average volume and superficial diameter values were derived from these measured signals by which the aerosol particles size distribution function can be restored.

Усложняющаяся экологическая обстановка вызывает необходимость определения реальных объемов загрязнения атмосферы, разработки передовых интеллектуальных технологий и лазерных роботизированных систем, позволяющих вести непрерывный мониторинг технологических процессов и состояния окружающей среды.

Для мониторинга загрязнения атмосферы важное значение имеют концентрация и дисперсный состав взвешенных частиц [1]. Поэтому целью настоящей работы является оценка параметров метода дифференциального поглощения для дистанционного измерения параметров дисперсного состава аэрозольного загрязнения атмосферного пограничного слоя над промышленным предприятием или целым районом.

Для достижения указанной цели наиболее целесообразным является разработка аэрозольного лидара дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР), которая позволит получать распределение аэрозольных

частиц по размерам в атмосфере по высоте над землей в режиме реального времени. Оптическая схема такого лидара построена на основе работ [1, 2]. В нашем случае лидар ДПР имел трёхволновый излучатель: два полупроводниковых лазера с длинами волн 405 и 655 нм и YAG:Nd-лазер с длиной волны 1064 нм (длительность импульсов 100 нс и средняя мощность 10 мВт при частоте следования импульсов до 100 кГц) [2]. Метод дифференциального ослабления и рассеяния основан на измерении спектрального коэффициента пропускания аэрозольного потока в некотором диапазоне волн [3].

Были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трёх длинах волн с помощью лидара ДПР и по измеренным сигналам ослабления лазерного излучения были рассчитаны значения среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента, по которым была восстановлена функция распределения аэрозольных частиц по размерам [4]. Метод получил распространение на ряде цементных заводов. Ведется работа по расширению применения метода.

Список литературы

1. Дьяченко В.В., Чартий П.В., Чартий Р.П., Шеманин В.Г. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы в реальном времени // Безопасность в техносфере. 2008. № 3. С. 36-43.

2. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Издательство «Лань», 2013.

3. Архипов В.А. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2007. № 1. С. 48-52.

4. Половченко С.В., Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 5. С. 43-49.

УДК 535(06)+004(06)

Д.О. ФЕДОРОВ[1], М.Ю. КОРЕНСКИЙ, К.Э. ЛАПШИН,
Д.В. ГАНИН, С.К. ВАРТАПЕТОВ[1]
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[1]ООО «Оптосистемы», Москва

СКАНИРУЮЩИЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ИЗ КОММЕРЧЕСКИ ДОСТУПНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Представлена схема и лабораторный макет перестраиваемого по длине волны лазера для оптической когерентной томографии из коммерчески доступных компонентов.

D.O. FEDOROV[1], M.Yu. KORENSKY, K.E. LAPSHIN,
D.V. GANIN, S.K. VARTAPETOV[1]
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[1]Optosystems Ltd, Moscow

WAVELENGTH SWEPT LASER FOR OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY BASED ON COMMERCIALLY AVAILABLE COMPONENTS

Optical scheme and laboratory setup of wavelength swept laser for optical coherence tomography based on commercially available components is presented.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является важным неинвазивным методом исследования в офтальмологии и других областях медицины. ОКТ позволяет получать двумерные и трёхмерные изображения внутренних структур биологических тканей в высоком разрешении in-situ путем детектирования обратного рассеянного излучения [1]. Одной из наиболее производительных и эффективных методик ОКТ является ОКТ с перестраиваемым источником [2]. В основе этой техники лежит применение лазера, перестраиваемого по длине волны в широком диапазоне. Обычно такие лазеры имеют высокую стоимость.

Целью работы является создание недорогого перестраиваемого источника для ОКТ. Конструкция представляет из себя лазер с кольцевым волоконным резонатором и сканирующим фильтром (рис. 1). В фильтр излучение заводится при помощи оптоволоконного циркулятора. Дифракционная решетка, работающая на прохождение, раскладывает

излучение в спектр, после чего оно перенаправляется телескопом на вращающееся полигональное зеркало. Узкая спектральная линия излучения, падающая на полигон по нормали, отражается назад в коллиматор. Таким образом происходит пространственная фильтрация спектральной полосы излучения [3]. Выходное излучение выводится при помощи волоконного каплера с соотношением 90/10.

Низкая стоимость источника достигается путем использования компонентов, применяемых в потребительской электронике и телекоммуникациях. Используется стандартная для оптоволоконных коммуникаций длина волны 1310 нм, для которой стоимость компонентов в разы ниже аналогов для других длин волн. Полигональный сканер применяется в лазерных принтерах. Единственными специализированными оптическими компонентами являются дифракционная решетка и телескоп. Итоговая общая стоимость компонентов источника существенно ниже аналогов.

Для подтверждения работоспособности источника была собрана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать мощность и спектр выходного излучения. На рис. 2 представлена фотография спектрального фильтра. Средняя мощность выходного излучения составила ~ 10 мВт. Диапазон перестройки длины волны ограничивается шириной усиления полупроводникового усилителя и составляет ~ 22 нм. Спектральная ширина линии составляет ~ 0.1 нм.

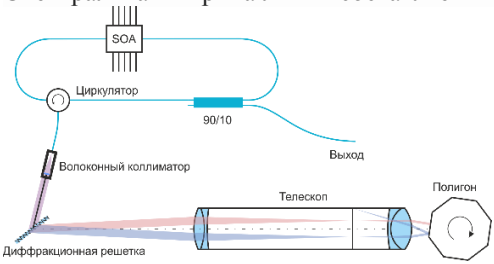


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

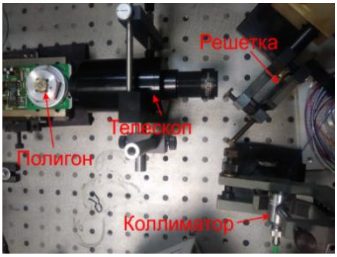


Рис. 2. Фото спектрального фильтра

Список литературы

1. Huang D. et. al. Optical coherence tomography // Science. 1991. V. 254. No. 5035. P. 1178-1181.

2. Grulkowski I. et. al. Retinal, anterior segment and full eye imaging using ultrahigh speed swept source OCT with vertical-cavity surface emitting lasers // Biomed. Opt. Express. 2012. V. 3. No. 11. P. 2733.

3. Yun S.H., Boudoux C., Tearney G.J., Bouma B.E. High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter // Opt. Lett. 2003. V. 28. No. 20. P. 1981-1983.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ДУДОВА, Д.В. ГАНИН[1], Б.С. ШАВКУТА[1],
О.С. КОРКУНОВА[2], Н.В. МИНАЕВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ

ЛАЗЕРНАЯ ДВУХФОТОННАЯ ПЕЧАТЬ ОПТИЧЕСКИХ РАСТРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ

Приведены результаты экспериментов по формированию микролинзовых растров из термостойких фоточувствительных полимерных материалов с помощью двух-фотонной 3D печати. В работе сформированы массивы микролинз, полученные согласно заданной трёхмерной модели.

D.S. DUDOVA, D.V. GANIN[1], B.S. SHAVKUTA,
O.S. KORKUNOVA[2], N.V. MINAEV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Baikal Institute of Nature Management of SB RAS, Ulan-Ude

TWO PHOTON LASER PRINTING OF OPTICAL RASTER FOR APPLIED OPTICS TASKS

The results of experiments on the formation of microlens rasters from heat-resistant photosensitive polymer materials using two-photon 3D printing are presented. In the work, arrays of microlenses obtained according to a given three-dimensional model are formed.

Работа направлена на разработку лазерного метода формирования оптической элементной базы с высоким разрешением на основе нового типа термостабильных полимеров для дальнейшего их использования для создания оптических элементов с индивидуальными расчетными характеристиками. Целью работы является сформировать рабочую микролинзу, а также исследовать оптические и механические свойства образца.

Для проведения экспериментов была использована система прецизионной лазерной двухфотонной 3D печати. В качестве лазерного источника использовался высокочастотный иттербиевый лазер с генератором второй гармоники с центральной длиной волны 525 нм.

Сканирование лазерным лучом производилось благодаря использованию двухкоординатного гальваносканера и XYZ системы трансляторов на воздушном подвесе. Точность перемещения луча составляет менее нм. Для фокусирования лазерного излучения использовался планарный ахроматический микроскопный объектив с числовой апертурой 0,4. В качестве фотополимерных композиций были использованы смеси, состоящие из поли-N,N′-(м-фенилен) изофталамида (МПА), олигомерных ароматических амидов с концевыми акриламидными группами, активного растворителя и фотоинициатора Irgacure 819.

В были исследованы различные режимы печать, включая печать с полным заполнением фигуры, а также с использование различных типов поддерживающих структур. В ходе экспериментов были получены микролинзовые растры, состоящие из плоско-выпуклых линз диаметром от 200 до 500 мкм. Разрешение печати составило менее 1 мкм. На рис. 1 представлены фотографии сформированного микролинзового растра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00414_мол_а.

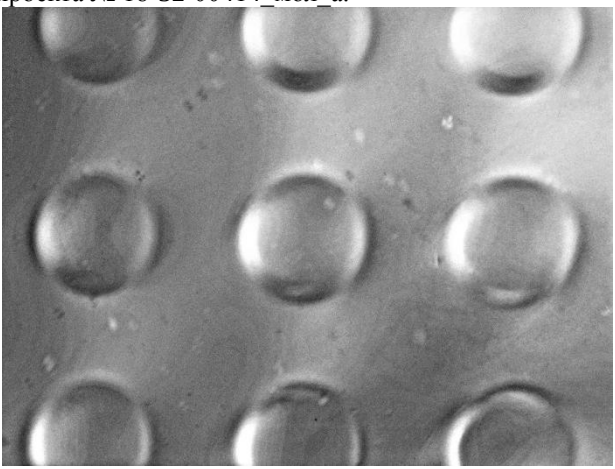


Рис. 1. Фотография микролинзового растра (200 x 200 мкм) после изготовления, сформированного с помощью двухфотонной печати, объектив 20X, разрешение печати – 1 мкм

Список литературы

1. Dudova D.S. et. al. UV laser formation of 3D structures based on thermally stable heterochain polymers // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135. No. 27. P. 46463.

2. Бурдуковский В. и др. Гетероцепные термостойкие полимеры для лазерной стереолитографии // Фотоника. 2016. № 2. С. 46-63.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ОСТАНИН, Ч. ЛИЦЗИН, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ПОРИСТЫХ СТЕКЛАХ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Представлены экспериментальные результаты по заполнению жидкостями лазерно-индуцированного волновода внутри пористого стекла с целью выявления его сенсорных свойств. Результаты свидетельствуют о возможности определения по относительному показателю преломления показатель преломления исходного пропитывающего вещества.

A.A. OSTANIN, ZHONG LIJING, R.A. ZAKOLDAEV
ITMO University, Saint-Petersburg

FEMTOSECOND LASER RECORDING OF WAVEGUIDE STRUCTURES IN POROUS GLASSES FOR TOUCH APPLICATIONS

Experimental results are presented on filling a laser-induced waveguide inside a porous glass with liquids in order to reveal its sensory properties. The results indicate the possibility of determining the relative refractive index of the refractive index of the initial impregnating substance.

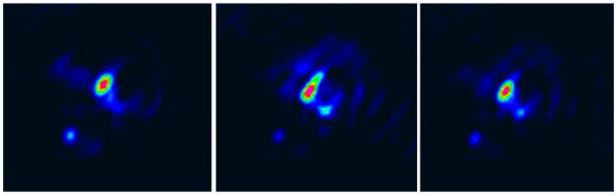
Пористые стекла широко применяются в научных и прикладных областях для изготовления сенсоров, микрофлюидных чипов и т.п. [1]. Преимуществами этих систем по сравнению с обычными аналитическими устройствами являются: ограниченный объем анализируемых образцов и используемых реагентов, возможность контроля и автоматизации этапов анализа, компактность, низкое энергопотребление [2].

Создание фотонных структур в таких материалах расширяет сферу их применения и меняют подход к инженерии микрочиповых устройств [3]. Например, интеграция волноводных компонент в чипе позволит сделать их: 1) более компактными за счет интеграции с волоконно-оптическими системами анализа реакций, проводимых в чипе; 2) с меньшим временем отклика, а операции по доставке излучения будут проходить с низкими потерями; 3) с повышенной спектральной чувствительностью за счет создания плазмонных волноводов.

Одним из ярких примеров является внедрение волноводов в экран смартфона, где они показали высокую чувствительность при измерении показателя преломления жидкостей [4]. Однако, на данный момент, не решен вопрос увеличения контраста показателя преломления (Δn) между оболочкой и сердцевиной волновода, что позволило бы создавать более компактные фотонные схемы. Также не было продемонстрировано создание волноводных структур в пористых силикатных стеклах.

В настоящей работе продемонстрирована запись волноводов внутри пористого стекла (размер пор ~ 8 нм, пористость 26 %), на глубине 300 – 500 мкм, в результате воздействия сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов (длительность импульса 300 фс, длина волны 1030 нм, частота следования импульсов 1 МГц, энергия в импульсе 0.5 - 2 мкДж). Построено распределение Δn на основании полученных картин распределения интенсивности при вводе-выводе излучения He-Ne лазера. Продемонстрирована динамика изменения оптических свойств волновода, в частности, изменение показателя преломления, при заполнении окружающей пористой матрицы дистиллированной водой.

На рис. 1 представлено распределение интенсивности исходного волновода в пористом стекле: до пропитки его водой (а), спустя 1 мин (б) и 15 мин (в). В результате исследования удалось оценить скорость прохождения дистиллированной водой (1.5 мкЛ) пористой матрицы.



а б в

Рис. 1. Распределение интенсивности в поперечном сечении волновода: до пропитки водой (а), в момент заполнения пространства вокруг волновода дистиллированной водой (б), в момент, когда жидкость прошла волновод (в)

Список литературы

1. Молчанова О.С. Натриевоборосиликатные и пористые стекла. Оборонгиз, 1961.

2. Janasek D., Franzke J., Manz A. Scaling and the design of miniaturized chemical-analysis systems // Nature. 2006. Т. 442. № 7101. С. 374.

3. Bellouard Y. et. al. Stress-state manipulation in fused silica via femtosecond laser irradiation // Optica. 2016. V. 3. №. 12. P. 1285-1293.

4. Lapointe J. et. al. Toward the integration of optical sensors in smartphone screens using femtosecond laser writing // Optics letters. 2015. V. 40. № 23. P. 5654-5657.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

РАЗРУШЕНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЁНКИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Приведены результаты исследования разрушений и модификации тонких пленок золота и титана на стеклянных подложках при наносекундном лазерном воздействии в процессе лазерной печати гелевыми микрокаплями. Динамика процесса изучалась по изменению мощности отраженного луча He-Ne-лазера. Показано, что измерения отражательной способности с наносекундным разрешением могут использоваться для более глубокого понимания лазерно-индуцированных динамических процессов, связанных с модификацией или разрушением металлических пленок, а также для оценки возникающих в области воздействия температур.

V.S. ZHIGARKOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk

DESTRUCTION AND MODIFICATION OF ABSORBING METAL FILMS DURING LASER PRINTING

The results of a study of the destruction and modification of thin gold and titanium glass coatings by nanosecond laser pulse in the process of laser printing by gel microdroplets are presented. The dynamics of the process was studied by measurements of the variability of power of the reflected beam of a He-Ne laser. It is shown that measurements of transient reflectivity with nanosecond resolution can be used for deeper understanding of the laser-induced dynamics processes associated with the modification or destruction of metal films and for evaluation of the temperatures that arise in the area of impact.

При осуществлении лазерной печати на донорную стеклянную пластинку с тонкой металлической пленкой наносится слой гелевого субстрата, содержащего живые клетки или частицы почв [1]. Импульсное лазерное излучение фокусируется на металлическом слое. Поглощение излучения приводит к быстрому локальному нагреванию металлической пленки и возникновению парогазового пузыря, быстрое расширение которого приводит к образованию гелевых микроструй и переносу микрокапли субстрата. Принципиальным преимуществом применения лазерной печати для задач микробиологии и медицины является

возможность целенаправленного переноса заданного микроскопического количества вещества (отдельные клетки и их агломераты). Актуальным является изучение динамики процесса с целью оптимизации параметров лазерного воздействия и минимизации побочных эффектов, связанных с выбросом наночастиц металла [2].

В процессе лазерной печати под действием лазерного импульса (λ = 1064 нм, τ = 8 нс) на тонкие пленки Au и Ti (50 нм) фокусировался пробный луч He-Ne-лазера (633 нм). Схема экспериментальной установки, примеры зарегистрированных сигналов и микроскопия участков плёнки, подвергшихся лазерному воздействию показаны на рис. 1. Временная зависимость переходной отражательной способности металлических пленок позволяет уточнить особенности лазерно-индуцированных динамических процессов, связанных с модификацией или разрушением пленок, а также оценить возникающие в пленке температуры [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (технология), грантов РФФИ № 18-32-00607 (процессы переноса) и 18-29-06056 (критические параметры) и стипендии Президента РФ № СП-2728.2019.4 (фокусировка).

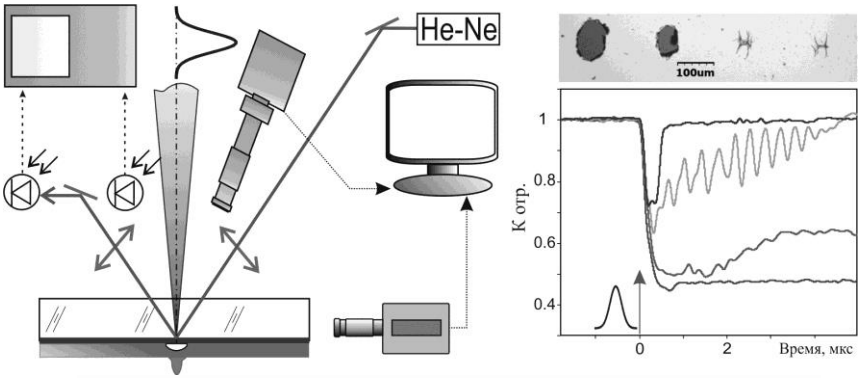


Рис. 1. Схема установки (слева), примеры зарегистрированных сигналов и микроскопия участков плёнки, подвергшихся лазерному воздействию (справа)

Список литературы

1. Юсупов В.И., Жигарьков В.С. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47 (12). С. 1158.
2. Зарубин В.П, Жигарьков В.С., Юсупов В.И., Карабутов А.А. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 11. С. 1068-1073.
3. Bischof J. et. al. // Physical review letters. 1996. V. 77 (8). P.1536.
4. Boneberg J., Bischof J., Leiderer P. // Optics communications. 2000. V. 174 (1-4). P. 145-149.

УДК 535(06)+004(06)

Д.И. ГОЖАЛЬСКИЙ, М.А. БАРАНОВ, И.А. РЕЗНИК,
С.А. ЧЕРЕВКОВ, А.Ю. ДУБОВИК, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИЗУЧЕНИЕ НАГРЕВА ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОПЛАСТИН CdSe В ИНТЕРЕСАХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

Предложено использовать полупроводниковые нанопластины в качестве микроскопических люминесцентных сенсоров для измерения локальной температуры, в частности, для отслеживания нагревания в сфокусированном пучке света объектов, изучаемых с помощью лазерного сканирующего микроскопа. Увеличение плотности мощности лазерного излучения приводит к красному спектральному сдвигу люминесценции, который рассматривается как следствие повышения температуры. В ходе опытов наблюдался разогрев до 130 °С.

D.I. GOZHALSKII, M.A. BARANOV, I.A. REZNIK,
S.A. CHEREVKOV, A.Yu. DUBAVIK, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF SEMICONDUCTOR NANOPLATELETS' (CdSe) LASER HEATING IN THE INTERESTS OF LUMINESCENT SCANNING MICROSCOPY

It is proposed to use semiconductor nanoplatelets as microscopic luminescent sensors for measuring the local temperature, in particular, for tracking the heating of objects under focused light beam studied using a laser scanning microscope. An increase in the power density of laser radiation leads to a red spectral shift of luminescence, which is considered as a consequence of rise in temperature. During the experiments, heating up to 130 ° C was observed.

При использовании лазерного сканирующего микроскопа плотность мощности сфокусированного лазерного пучка может достигать величин, достаточных для обратимого или необратимого изменения свойств образца вследствие его нагревания, если отвод тепла недостаточен. Соответственно, требуются средства измерения температуры в области сканирования. С этой проблемой могут справиться полупроводниковые кристаллы, чувствительные собственными оптическими параметрами к температуре. Естественно для этих целей использовать зависимость от

температуры величин, измеряемых с помощью микроскопа, таких как интенсивность или спектральное положение фотолюминесценции, линий комбинационного рассеяния, время затухания люминесценции.

Ранее было показано [1], что наиболее эффективно определение температуры посредством спектрального смещения. При увеличении температуры наблюдается сдвиг спектра люминесценции в красную область, а при охлаждении, соответственно, в синюю (рис. 1), подобно известным закономерностям поведения квантовых точек [2].

После выполнения калибровки по температуре были проделаны опыты по разогреву нанопластин лазерным излучением. На рис. 2 можно видеть, как менялся спектр люминесценции при увеличении мощности лазера — по мере её повышения интенсивность люминесценции снижается, а коротковолновая полоса спектра смещается в сторону больших длин волн, что естественно интерпретировать как свидетельство нагревания образца.

Зависимость положения максимума интенсивности от мощности излучения оказалась нелинейной (рис. 2): она близка к экспоненциальной. После температурной калибровки удалось установить, что повышение температуры составило 105 °C при сканируемой площадке 280 x 280 мкм.

Наблюдения за самим образцом в ходе измерений с помощью микроскопа показывают усиливающийся с ростом интенсивности света выход вещества в случайном направлении из центра засветки, который, вероятно, снижает её влияние на измеряемую температуру и является одной из причин ослабления показанной на рис. 2 зависимости (отклонение от ожидаемой линейности) по мере увеличения мощности.

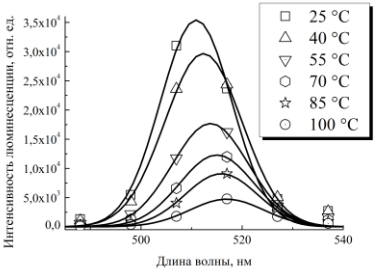


Рис. 1. Спектры люминесценции полупроводниковых нанопластин при различных температурах

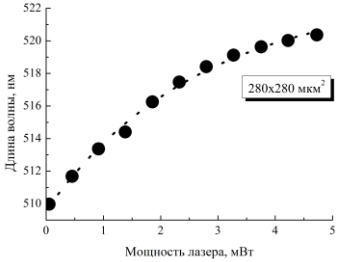


Рис. 2. Зависимость длины волны максимума люминесценции от мощности лазерного излучения

Список литературы

1. Gozhalskiy D.I., Veniaminov A.V. et. al. // Opt. and spectrosc. 2018, V. 125. P. 769-772.
2. Walker G.W., Sundar V.C. et. al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 3555-3557.

УДК 535(06)+004(06)

С.А. МИНАЕВА, Н.В. МИНАЕВ, А.В. МИРОНОВ,
О.А. МИРОНОВА, М.А. СЯЧИНА, Э.К. КРУМИНЬШ[1],
С.М. ХОДЛ[1], В.К. ПОПОВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк
[1]Ноттингемский университет, Великобритания

УСТАНОВКА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Представлена разработанная установка селективного лазерного спекания (СЛС), позволяющая осуществлять формирование трёхмерных структур из порошковых материалов с разрешением до 10 мкм. Тестовые эксперименты проведены как с широко применяемым для процесса селективного лазерного спекания материалом, так и с новыми синтезированными порошковыми материалами с размером частиц до 0,5 мкм.

S.A. MINAEVA, N.V. MINAEV, A.V. MIRONOV, O.A. MIRONOVA,
M.A. SYACHINA, E. KRUMINS[1], S.M. HOWDLE[1], V.K. POPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Troitsk
[1]University of Nottingham, United Kingdom

INSTALLATION OF SELECTIVE LASER SINTERING WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

The developed installation of selective laser sintering (SLS), which allows the formation of three-dimensional structures from powder materials with a resolution of up to 10 μm is presented. Test experiments were both with material widely used for the process of selective laser sintering, and with new synthesized powder materials with a particle size of up to 0.5 μm.

Селективное лазерное спекание (СЛС), одна из основных технологий аддитивного производства, основанная на послойном лазерно-индуцированном спекании порошковых материалов различных типов (металлы, керамика, полимеры). Потенциальные возможности технологии СЛС для полимерных материалов ограничены, так как ограничен выбор подходящих для этого полимеров (главным образом, полиамидов и полистиролов, а также их композитов), неидеальна (отлична от сферической) форма и морфология поверхности частиц их мелкодисперных (характерный диаметр порядка 40 - 80 мкм) порошков с

широким распределением по размерам, не оптимальны реологические и оптические свойства порошковых материалов.

Разработана установка СЛС, позволяющая исследовать возможности применения новых материалов для этой технологии – порошков микронной и субмикронной фракции. Установка позволяет проводить исследования на малых объемах полимерных порошков, а также на их водных и спиртовых суспензиях, отрабатывая параметры процесса спекания, в частности для достижения высокого пространственного разрешения (порядка 10 мкм). Установка состоит из двух модулей. Разработана прецизионная поршневая система формирования тонких (менее 20 мкм) слоев порошкового материала. Для реализации процесса спекания используется оптическая система, основанная на компактном гальваносканере и телецентрическом F-theta объективе, позволяющая доставлять сфокусированное (пятно от 15 мкм в диаметре) лазерное излучение на рабочую поверхность слоя полимерного порошка.

На разработанной установке проведено формирование тестовых структур из различных материалов. Для экспериментов использовался порошок стандартного для СЛС материала полиамида (ПА). На частицы ПА было нанесено покрытие с красителем, улучшающим поглощение этого материала на используемой длине волны (405 нм). Использовался разработанный новый порошок сферических микрочастиц полиметилметаакрилата со средним диаметром от 0,5 до 3 мкм [1], для которого было достигнуто разрешение СЛС около 40 мкм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития аддитивных лазерных технологий и РФФИ (17-53-10014 КО_а) в части разработки методики синтеза порошков микронного размера.

Список литературы

1. McAllister T.D., Farrand L.D. et. al. // Macromolecular Chemistry and Physics. 2016. V. 217. No. 20. P. 2294-2301.

УДК 535(06)+004(06)

К.В. ГУБАЙДУЛЛИНА, А.В. ВОЗИАНОВА, М.С. МАСЮКОВ, М.К. ХОДЗИЦКИЙ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИРАЛЬНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

С помощью численного моделирования методом конечных разностей во временной области исследовано влияние геометрических параметров киральных резонаторов с различными типами симметрий на поляризационные свойства оптически активных метаповерхностей.

K.V. GUBAIDULLINA, A.V. VOZIANOVA, M.S. MASYUKOV, M.K. KHODZITSKY
ITMO University, Saint-Petersburg

NUMERICAL CALCULATION OF CHIRAL METASURFACES USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Using numerical simulation by the Finite Difference Time Domain method, the influence of the geometric parameters of chiral resonators with various types of symmetries on the polarization properties of an optically active metasurface is studied.

С быстрым развитием методов генерации и детектирования, а также с появлением эффективных терагерцовых источников и чувствительных детекторов, возрастают требования к функциональным устройствам, таким как терагерцевые поляризаторы. Обычные преобразователи поляризации, такие как четвертьволновая пластина, полуволновая пластина и вращатель поляризации, используют объемные материалы. Альтернативой сложным трёхмерным структурам могут быть плоские метаматериалы толщиной в несколько десятков нанометров, называемые метаповерхностями.

Метаповерхности обеспечивают пространственно изменяющийся оптический отклик и облегчают интеграцию функциональных материалов для обеспечения активного контроля параметров прошедшего или отраженного света (интенсивности, фазы, поляризации и др.) и значительного усиления нелинейно-оптического отклика. Материалы с киральностью [1] могут вращать плоскость поляризации

электромагнитных волн и очень подходят для создания поляризационных контроллеров, поскольку они предоставляют новые способы управления электромагнитными волнами с использованием плоских структур (рис. 1).

Коммерческое программное обеспечение, используемое для расчета параметров таких метаматериалов, разработано для широкого круга задач и для расчета параметров киральных сред с различной геометрией применяет общие принципы построения сетки. Такой упрощенный подход существенно влияет на точность расчетов для структур со сложной геометрией элементарной ячейки. Поскольку индивидуальное задание сетки вычислительной области напрямую связано с увеличением вычислительной сложности, то в коммерческих пакетах это реализовывать невыгодно. Однако для расчета параметров метаповерхности с киральным резонатором определенной формы важно получить наиболее точные результаты. Форму резонатора задает выбранный тип симметрии, также значительно влияющий на рабочий диапазон устройства [2] и применяемый в представленных численно-аналитических исследованиях.

В этой работе представлены результаты численного моделирования параметров киральных метаповерхностей методом конечных разностей во временной области [3] и влияние различных типов симметрии резонаторов на поляризационные свойства структуры. Так, например, исследуется яркий пример метаповерхности симметрии типа C4 – резонатор в форме крестообразного гаммадиона [4] (рис. 2).

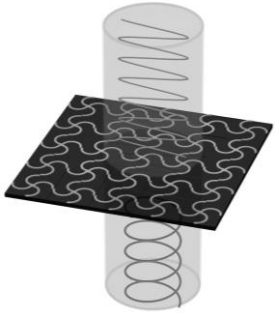


Рис. 1. Преобразование поляризации с помощью киральной метаповерхности [4]

Рис. 2. Резонатор в форме крестообразного гаммадиона

Список литературы

1. Plum E., Zhou J. et. al. // Physical Review B. 2009. V. 79. № 3. P. 035407.
2. Menzel C., Rockstuhl C. et. al. // Physical Review A. 2010. V. 82. № 5. P. 053811.
3. Taflove A., Hagness S.C. // Artech house. 2005.
4. Masyukov M.S., Vozianova A.V. et. al. // IEEE. 2019. P. 8874144.

УДК 535(06)+004(06)

М.В. САХАРОВ, В.Г. СРЕДИН, А.Э. ЗАПОНОВ, Д.С. КОНРАДИ, И.В. КУЗНЕЦОВ

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ, НАВЕДЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

В рамках модели, основанной на решении трёхмерного уравнения теплопроводности, рассмотрена эволюция тепловых полей в многослойных полупроводниковых структурах, используемых для создания различных оптоэлектронных приборов, при воздействии на них интенсивного лазерного излучения. В настоящей работе эта задача решается методом численного моделирования, с использованием пакета программ ЛОГОС.

M.V. SAKHAROV, V.G. SREDIN, A.E. ZAPONOV, D.S. KONRADI, I.V. KUZNETSOV

Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Forces, Balashiha

COMPUTER SIMULATION OF THERMAL FIELDS EVOLUTION INDUCED BY LASER RADIATION IN MULTILAYER SEMICONDUCTOR STRUCTURES

In the framework of the model based on the solution of the three-dimensional equation of thermal conductivity, the evolution of thermal fields in multilayer semiconductor structures used to create various optoelectronic devices, with the effect of intense laser radiation on them, is considered. In this paper, this problem is solved by numerical modeling, using the software package LOGOS.

Современные полупроводниковые оптоэлектронные приборы создаются на основе многослойных структур, включающих в себя материалы, обладающие различными электрофизическими, оптическими и теплофизическими свойствами. При воздействии на них лазерного излучения (ЛИ) в области поглощения света создается локальный тепловой источник, и дальнейшие физические процессы в структуре определяются переносом тепла от него. Расчет возникающих температурных полей, основан на решении нестационарного трёхмерного уравнения теплопроводности, с соответствующими начальными и граничными условиями [1, 2], позволяет прогнозировать эффекты нагрева

структуры, однако учет особенностей конструкции, взаимодействия ЛИ с материалами структуры усложняет расчет, который возможен только численными методами в конечно-разностной форме с использованием обеспечивающих требуемую детализацию сеток. Это, приводит к существенным временным затратам, которые компенсируются распараллеливанием алгоритма и использованием высокопроизводительных ЭВМ. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров) относится к таким средствам, реализующим численные алгоритмы решения задач аэро-, гидро- и газодинамики, деформации, тепломассопереноса и излучения и т.д. [3].

С помощью пакета ЛОГОС рассмотрен фрагмент матрицы фотодиодов на основе InSb размерностью 32 × 32 элементов размером 25 × 25 мкм с шагом 10 мкм между элементами. Диоды сформированы на Si-подложке толщиной 350 мкм при толщине InSb слоя 25 мкм, в качестве контактов фоточувствительных элементов с мультиплексором используются индиевые столбы размером 15 мкм и высотой 8 мкм. При моделировании выбрано ЛИ с длиной волны 2,94 мкм, энергией в импульсе 3,5 мДж и длительностью импульса 200 мкс полностью накрывающего один элемент в центре МФП. Плотность мощности падающего ЛИ составила ~ 1.4 МВт/см^2.

Результаты расчетов показывают, что при концентрации ЛИ на одном элементе при плотности мощности ~ 0.8 МВт/см^2 через 12 мс происходит нагрев всего МФП до температуры выше 150 К, при которой уровень тепловых шумов в фоточувствительном слое InSb возрастает до значения, не позволяющего ему регистрировать ИК-излучение. При этом температура облучаемого элемента к этому моменту времени достигает 445 К, что существенно меньше температуры плавления InSb. Кроме того, нагретая область InSb-слоя приводит к нагреву Si-подложки в направлении, противоположном падающему ЛИ. Таким образом, при интенсивных режимах воздействия ЛИ нагретая подложка сама становится источником ИК-излучения и препятствует нормальной регистрации полезного сигнала, экранируя его.

Список литературы

1. Средин В.Г., Сахаров М.В // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5-11.

2. Сахаров М.В., Средин В.Г., Астраускас Й.И., Васильева Ю.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 98-101.

3. Электронный ресурс URL: http://logos.vniief.ru, дата обращения 18.11.2019 г.

УДК 535(06)+004(06)

И.А. РЕЗНИК, А.А. МАТЮШКИНА, А.Ю. ДУБОВИК,
А.О. ОРЛОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ И ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Отсутствующие в природе магнитно-люминесцирующие материалы могут найти разнообразное применение в экологическом мониторинге и в биомедицинских приложениях. В данной работе описаны магнитно-оптические свойства и их фотоиндуцированное изменение нанокомпозитов, состоящих из суперпарамагнитного ядра Fe_3O_4, покрытого люминесцирующим квантоворазмерным слоем CdSe, который в свою очередь окружен пассивирующей оболочкой ZnS. Исследованы оптические, люминесцентные и магнитно-оптические свойства коллоидных нанокомпозитов Fe_3O_4/CdSe/ZnS.

I.A. REZNIK, A.Yu. DUBAVIK, A.A. MATUSHKINA,
A.O. ORLOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

CHARACTERIZATION AND PHOTOINDUCED CHANGE OF THE OPTICAL PROPERTIES OF MAGNETO-LUMINESCENT NANOCOMPOSITES

Magneto-luminescent materials that do not exist in nature can find a wide application in the biomedical and environmental fields. In this work we describe magneto-optical properties and their photoinduced change of core-shell-shell nanocomposites comprised of a Fe3O4 supermagnetic nanoparticle covered with quantum-sized brightly luminescent CdSe layer, in its turn surrounded by ZnS passivating shell. The optical, luminescent, and magneto-optical properties of colloidal Fe3O4/CdSe/ZnS core-shell SPIONs have been studied.

Отсутствие в природе материалов, характеризующихся высоким квантовым выходом люминесценции и высокой степенью намагниченностью, вызывает интерес к синтезу сложных наноструктурированных комплексов, необходимых в экологическом мониторинге и в биомедицинских приложениях. Особый интерес представляет способ создания такой системы путем последовательного наращивания оболочек CdSe и ZnS на магнитную частицу Fe_3O_4 [1].

Подобный подход позволяет получить стабильные коллоидные нанокомпозиты с хорошо контролируемыми люминесцентными и магнитными свойствами. Одной из ключевых проблем классических полупроводниковых нанокристаллов является нестабильность их фотофизических свойств под действием внешнего фотооблучения [2]. Очевидно, что сложные нанокомпозиты на основе классических полупроводниковых материалов также могут быть подвержены данной проблеме. При этом не известны закономерности, по которым происходят процессы фотоактивации в нанокомпозитах, сочетающих в себе как квантоворазмерные люминесцирующие полупроводниковые, так и парамагнитные материалы.

В данной работе были исследована стабильность фотофизических и магнитных свойств нанокомпозитов, состоящих из суперпарамагнитных наночастиц Fe_3O_4 (SPIONs) и внешней квантоворазмерной люминесцирующей оболочки CdSe/ZnS. Наращивание полупроводниковой оболочки CdSe на SPIONs со средним размером 10 нм сопровождалось увеличением размера нанокомпозитов до 13 нм, а также появлением экситонного пика в спектре поглощения образцов на 585 нм и полосы люминесценции с максимумом на 605 нм и шириной полосы 34 нм. Спектры МКД нанокомпозитов Fe_3O_4/CdSe/ZnS характеризуются теми же переходами, что и исходные SPIONs. Анализ кинетики экситонной люминесценции нанокомпозитов показал, что распад их люминесценции описывается трёхэкспоненциальной функцией с характерными временами затухания 0,7, 6,0 и 35,0 нс. В результате фотооблучения образцов суммарной дозой в 35 Дж, характерные времена затухания люминесценции увеличились на 26, 39 и 11 % для короткой, средней и длинной компонент, соответственно. Что свидетельствует об успешной фотопассивации поверхности нанокомпозитов и увеличении их квантового выхода люминесценции. В результате работы были получены коллоидные нанокомпозиты Fe_3O_4/CdSe/ZnS характеризующиеся высокой фотостабильностью и пригодные для биомедицинских приложений.

Список литературы

1. Du G.H. et. al. Fe_3O_4/CdSe/ZnS magnetic fluorescent bifunctional nanocomposites // Nanotechnology. 2006. V. 17. № 12. P. 2850.

2. Carrillo-Carrión C. et. al. Quantum dots luminescence enhancement due to illumination with UV/Vis light // Chemical Communications. 2009. V. 35. P. 5214-5226.

УДК 535(06)+004(06)

И.М. БЕЛОУСОВА, О.Б. ДАНИЛОВ, А.П. ЖЕВЛАКОВ,
И.О. ПОПОВА[1], И.И. ШАГАНОВ
Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург
[1]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В ОКСИДАХ ВАНАДИЯ

Проведен сравнительный анализ моделей фазовых переходов полупроводник-металл в нанокристаллических пленках V_2O_3 и VO_2.

I.M. BELOUSOVA, O.B. DANILOV, A.P. ZHEVLAKOV,
I.O. POPOVA[1], I.I. SHAGANOV
S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg
[1]Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

PHOTOPHYSICAL NANOSIZED EFFECTS BY PHASE TRANSITIONS IN VANADIUM OXIDES

A comparative analysis of the semiconductor-metal phase transition models in nanocrystalline V_2O_3 and VO_2 films is carried out.

Показано [1, 2], что в основе моделей фазовых переходов полупроводник-металл (ФППМ) лежит положение о комплексном мотт-пайерлсовском характере фазовых переходов в каждом нанокристаллите пленки: ФППМ состоит из безгистерезисного протяжённого по T электронного перехода Мотта и следующего за ним скачкообразного по T структурного перехода Пайерлса, обладающего термическим гистерезисом. Установлено [1, 2], что T_c структурного ФП определяется в каждом нанокристаллите пленки превышением температуры над T_c – температурой равновесия полупроводниковой и металлической фаз - на величину ΔT, зависящую от среднего поперечника r нанокристаллита по закону $\Delta T \sim 1/(r)^{1/2}$.

Моделирование процесса ФППМ основано на том, что VO_2 ниже $T_c = 340$ K имеет моноклинную симметрию кристаллической решетки, являясь полупроводником ($E_g \sim 0{,}8$ эВ), а выше T_c – металлом с тетрагональной симметрией решетки, тогда как V_2O_3 ниже $T_c = 140$ K является антиферромагнитным полупроводником (E_g~0,4 эВ) с

моноклинной симметрией решетки, а выше T_c – парамагнитным металлом с ромбоэдрической симметрией решетки (типа корунда). Установлено, что в обоих соединениях электронный переход Мотта в металлическую фазу обусловлен опусканием по энергии π^*-зоны проводимости благодаря корреляционным эффектам, а структурный переход Пайерлса – двукратным удвоением периода пиков потенциала одномерной цепочки.

Для иллюстрации наличия мартенситных свойств ФППМ в малоизученном тонкопленочном материале V_2O_3 методом лазерной абляции были синтезированы образцы пленок полутораоксида ванадия на подложке из лейкосапфира и выполнены исследования температурной зависимости пропускания в области $\lambda = 4$ мкм. Наблюдался (рис. 1) высокотемпературный сдвиг нагревной ветви петли на 15 К при уменьшении вдвое среднего поперечника нанокристаллитов плёнки, что соответствует мартенситному характеру ФППМ в обоих соединениях.

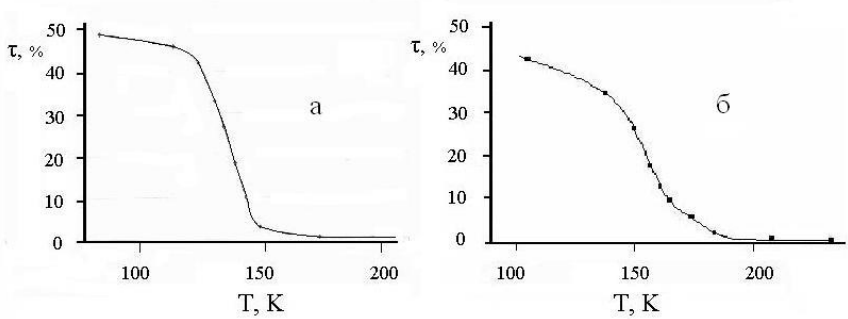


Рис. 1. Оптическое пропускание пленки V_2O_3 на длине волны 4 мкм вблизи температуры фазового перехода полупроводник-металл: толщиной 200 нм, T_c = 140 К (а) , толщиной 100 нм, T_c = 155 К (б)

К наиболее важным областям применения тонкопленочных материалов на базе оксидов ванадия следует отнести создание оптических корреляторов для обработки оптической информации [3], оптических датчиков температуры [4] и оптических лимитеров для защиты фотоприемной аппаратуры [5].

Список литературы

1. Ильинский А.В., Квашенкина О.Е., Шадрин Е.Б. // ФТП. 2012. V. 46 (4). P. 439.
2. Ильинский А.В., Пашкевич М.Э., Шадрин Е.Б. // НТВ СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2017. Т. 10 (3). С. 9.
3. Horner J.L., Gianino P.D. // Phase-only matched filtering. Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 812-816.
4. Bao X., Webb D.J., Jackson D.A. // Opt. Lett. 1993. V. 18. P. 1561-1563.
5. Wood G.L., Clarc W.W. et. al. // Proc. SPIE. 1989.

УДК 535(06)+004(06)

А.Д. РЕЗВЫХ, М.С. МЕГЕДЬ, П.С. ДЕМЧЕНКО,
М.К. ХОДЗИЦКИЙ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ И УЛЬТРАТОНКИХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Представлены теоретические формулы, разработанные с целью уточнения соотношения Тинкхема. Приведенные формулы выведены в условиях меньшего количества приближений и претендуют на более точное описание реальной дисперсии проводимости тонких пленок. Также в работе приводятся результаты экспериментального исследования проводимости монослоя графена в ТГц диапазоне частот с помощью методов импульсной терагерцовой спектроскопии.

A.D. REZVYKH, M.S. MEGED, P.S. DEMCHENKO,
M.K. KHODZITSKY
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN AND ULTRATHIN CONDUCTING FILMS BY MEANS OF TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY

Theoretical formulas for clarification of Tinkham equation were derived. These equations are supposed to obtain the conductivity of thin films more accurately due to smaller amount of approximations taken into account. The experimental research of conductivity of graphene monolayer in THz frequency range by means of terahertz time-domain spectroscopy is discussed.

На сегодняшний день не существует более удобных методов расчета оптических свойств, таких как поверхностная фотопроводимость тонких проводящих пленок в ТГц диапазоне частот, чем формула Тинкхема. Однако данная формула позволяет точно рассчитать проводимость лишь в ограниченных случаях выполнения ряда приближений [1]. Тонкие проводящие пленки, в частности, графена, находят применение во многих областях ТГц технологий в качестве генераторов, детекторов и модуляторов ТГц поля [2]. Следовательно, чрезвычайно важно иметь математический аппарат для извлечения оптических свойств таких материалов из экспериментальных данных. Подобного аппарата, учитывающего поглощение, низкую проводимость и интерференционные

эффекты в пленках, на данный момент нет. Приведем полученные нами формулы для пропускания пленки с подложкой:

$$T = \frac{(1-R_{13})(1-R_{34})e^{-\alpha_{sub}d_{sub}}}{1-R_{13}R_{34}e^{-2\alpha_{sub}d_{sub}}} \quad (1)$$

и отражения от пленки на подложке:

$$R = R_{13} + \frac{(1-R_{13})(1-R_{31})e^{-2\alpha_{sub}d_{sub}}}{1-R_{31}R_{34}e^{-2\alpha_{sub}d_{sub}}} R_{34}, \quad (2)$$

где $R_{ij} = \frac{(n_i+y_1-n_j)^2+y_2^2}{(n_i+y_1+n_j)^2+y_2^2}$ $(ij = \{21,23,32,12\})$,

$R_{ij} = R_{i2} + \frac{(1-R_{i2})(1-R_{2i})e^{-2\alpha_f d_f}}{1-R_{2j}R_{2i}e^{-2\alpha_f d_f}}$ $(ij = \{13,31\})$ - коэффициенты отражения от границ пленки с учетом ненулевой толщины пленки.

В приведенных формулах n и n' – показатели преломления подложки и пленки соответственно, α_f и α_{sub} – коэффициенты поглощения пленки и подложки, d_f и d_{sub} – толщины пленки и подложки, $y_1 + iy_2 = \frac{4\pi}{c}\sigma$ – произведение импеданса свободного пространства и поверхностной проводимости σ. Индексам 1, 2 и 3 соответствуют следующие среды: воздух, пленка и подложка, соответственно.

Для проверки теории проведен эксперимент с исследованием проводимости монослоя графена (рис. 1) на кварцевой подложке.

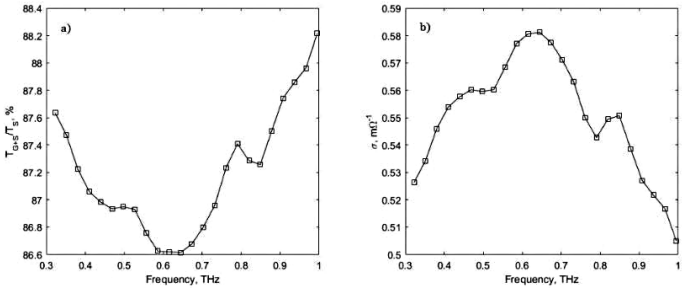


Рис. 1. Частотные зависимости пропускания графена относительно подложки (a) и проводимости графенового монослоя (b)

Предложенные в данной работе формулы позволят более точно рассчитывать поверхностную проводимость тонких пленок и не будут ограничивать исследователей набором труднодостижимых ограничений.

Список литературы

1. Tu J.J., Homes C.C., Strongin M. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. No. 1. P. 017402.
2. Wang M., Yang E.-H. // Nano-Structures & Nano-Objects. 2018. V. 15. P. 107.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. ОЛЕЙНИЧУК, А.А. ТУЙЦЫНА, В.С. ЖИГАРЬКОВ,
Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ
Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Троицк

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ТЕРМОКАВИТАЦИИ

Приведены результаты исследования термокавитации, происходящей в воде вблизи торца лазерного волокна при воздействии непрерывного лазерного излучения умеренной мощности с длинами волн 1.56 и 1.94 мкм. Динамика процесса изучалась с помощью: 1) сфокусированного вблизи торца пробного луча He-Ne-лазера; 2) скоростной видеосъемки; 3) акустических и 4) тепловизионных методов.

E.A. OLEINICHUK, A.A. TUYTSYNA, V.S. ZHIGARKOV,
N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Troitsk

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LASER INDUCED THERMOCAVITATION

The results of studies of thermocavitation occurring in water near the tip of a laser fiber under the action of moderate-power CW laser radiation with wavelengths of 1.56 and 1.94 μm are presented. The dynamics of the process was studied using: 1) a probe beam of a He-Ne laser focused near the fiber tip; 2) high-speed video recording; 3) acoustic and 4) thermal imaging methods.

В работе приведены результаты исследования термокавитации, происходящей в воде вблизи торца лазерного волокна при воздействии непрерывного лазерного излучения умеренной мощности с длинами волн 1.56 и 1.94 мкм.

В качестве источника лазерного излучения использовались волоконные лазеры умеренной мощности (ИРЭ-Полюс-IPG), состыкованные с кварц-полимерным волокном с диаметром светопроводящей жилы 400 мкм. Лазерное волокно заводилось с помощью стального капилляра в наполненную дистиллированной водой кювету размером 115 x 40 x 23 мм из оргстекла. Динамика процесса изучалась с помощью: 1) сфокусированного вблизи торца пробного луча He-Ne-лазера; 2) скоростной видеосъемки; 3) акустических и 4) тепловизионных

методов. Мощность прошедшего пробного луча с наносекундным разрешением регистрировалась с помощью скоростного фотоприемника 00-08AF/C. Скоростная съемка производилась с использованием высокоскоростной камеры Fastcam SA-3 на скорости до 20 кк/с.

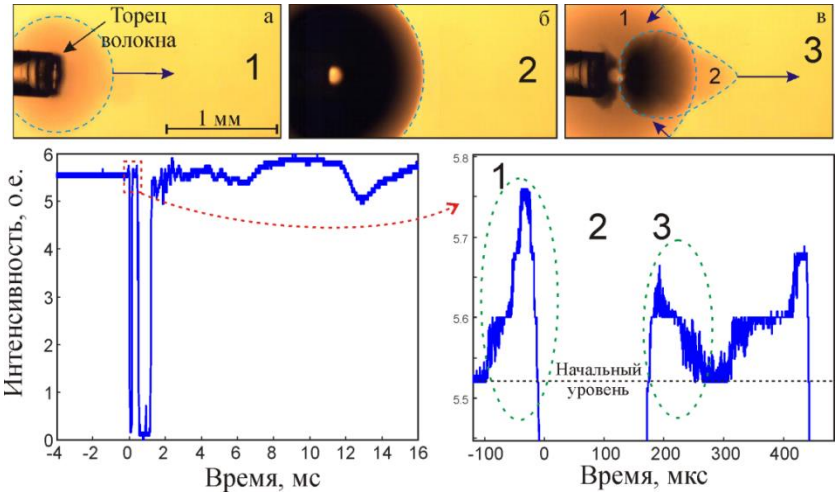


Рис. 1. Термокавитация – сопоставление кадров скоростной съемки и интенсивности сигнала пробного луча гелий-неонового лазера с фотоприемника, жирными цифрами 1-3 отмечены характерные стадии процесса

Полученные результаты (рис. 1) интересны с чисто научной и практической точек зрения. Они необходимы, например, для оптимизации лазерного воздействия в ряде медицинских технологий [1-4].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (технология), грантов РФФИ № 18-32-00607 (процессы переноса) и 18-29-06056 (критические параметры).

Список литературы

1. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M., Bagratashvili V.N. // in Hydrodynamics - Advanced Topics /ed. by H.E. Schulz, A.L.A. Simoes, R.J. Lobosco. Croatia: InTech, 2011. P. 95-118.

2. Чудновский В.М. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 4. С. 361-370.

3. Чудновский В.М. и др. // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 4. С. 578-587.

4. Минаев В.П. и др. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49 (4). С. 404-408.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. АЙМУХАНОВ, А.В. ЗАВГОРОДНИЙ, Ж.Ж. АХАТОВА
Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИГИДРОДИБЕНЗОТЕТРААЗААННУЛЕНА

Представлены результаты исследования спектра поглощения дигидродибензотетраазааннулена (ТАА). Твердая пленка ТТА на подложке с токопроводящей поверхностью ITO (оксид индия-олова) была получена методом термического испарения в вакууме. Проведены измерения вольт-амперных характеристик полученной пленки.

A.K. AIMUKHANOV, A.V. ZAVGORODNIY, Zh.Zh. AKHATOVA
The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

OPTICAL AND PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF THIN FILMS OF DIHYDRODIBENZETETRAAZAANANULENE

The results of studies of the absorption spectrum of dihydrodibenzotetraazannuline (TAA) are presented. A solid TTA film on a substrate with an ITO conductive surface (indium tin oxide) was obtained by thermal evaporation in vacuum. The current – voltage characteristics of the obtained film were measured.

Тонкая органическая пленка ТТА получена методом термического вакуумного осаждения (10^{-5} торр) на поверхности стекла с токопроводящим покрытием ITO. Толщина пленки составила ~ 100 нм. Для проведения электрических измерений методом термического испарения в вакууме на поверхность пленки наносился алюминиевый электрод.

Измерение оптических характеристик пленок проводились на спектрометре Avantes AvaSpec-ULS2048CL-EVO. Вольтамперные характеристики (ВАХ) получены при помощи потенциостата-гальваностата P20X в режиме линейной развертки. В качестве имитатора солнечного света использована ксеноновая лампа в диапазоне длин волн 350 - 800 нм и мощностью 100 мВт/см^2.

На рис. 1 приведен спектр поглощения твердой пленки ТТА. В спектре поглощения имеются три очень интенсивные полосы в области 300 - 460 нм Максимумы поглощения приходятся на 380, 440 и 467 нм.

Спектр поглощения значительно отличается от спектров металлофталоцианиновых комплексов. В частности, в спектре поглощения ТТА отсутствуют максимумы поглощения в Q-диапазоне.

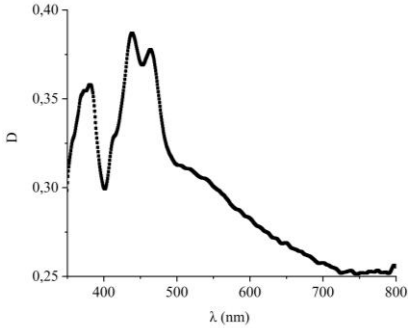


Рис. 1. Спектр поглощения пленки ТТА

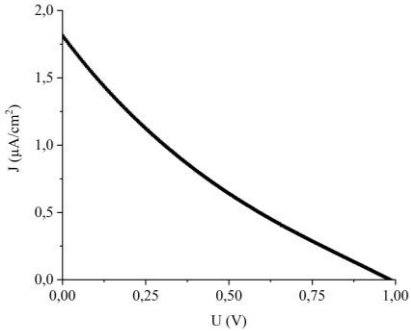


Рис. 2. Вольтамперная характеристика пленки ТТА

На рис. 2 показана вольтамперная характеристика органической тонкой пленки. Из рис. 2 видно, что ВАХ является нелинейной. Значения напряжения холостого хода U_{oc} = 0,98 В, тока короткого замыкания I_{sc} = 1,8 мкА/см^2, фактора заполнения FF = 0,2 определяли согласно методике [4]. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность использования органической пленки ТТА в качестве светочувствительных элементов органической электроники.

Список литературы

1. Brutting W. Physics of organic semiconductors. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.

2. Kryglenko I.V., Snopok B.A., Shirshov V.M., Vengher E.F. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. 2000. V. 3. No. 4. P. 529.

3. Орлов В.Д., Удовицкий В.Г. // Мат. межд. конф. «SENSOR–TECHNO-93», Санкт-Петербург, 1993. С. 283.

4. Khanam J.J., Foo S.Y. Modeling of high-efficiency multi-junction polymer and hybrid solar cells to absorb infrared light // Polymers. 2019. V. 11. Is. 2, P. 2323-2325.

УДК 535(06)+004(06)

А.К. АЙМУХАНОВ, А.В. ЗАВГОРОДНИЙ, Б.Р. ИЛЬЯСОВ, А.К. ЗЕЙНИДЕНОВ

Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВАХ ОБЪЕМНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА ПОЛИМЕРНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Представлены результаты исследования влияния магнитного поля на фотоэлектрические полимерного солнечного элемента. Показано, что увеличение отрицательного эффекта магнитного поля при добавлении нанолент приводит к увеличению дефектности структуры объемного гетероперехода полимерного солнечного элемента.

A.K. AIMUKHANOV, A.V. ZAVGORODNIY, B.R. ILYASSOV, A.K. ZEINIDENOV

The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD ON THE IVC OF A BULK HETEROJUNCTION OF A POLYMER SOLAR ELEMENT

The results of a study of the effect of a magnetic field on a photovoltaic polymer solar cell are presented. It is shown that an increase in the negative effect of the magnetic field upon the addition of nanowires leads to an increase in the defectiveness of the structure of the bulk heterojunction of the polymer solar cell.

Высокая подвижность носителей заряда и высокие фотоэлектрические показатели позволяют рассматривать металло-фталоцианины в качестве перспективных материалов для фотовольтаических устройств [1, 2]. Путем создания новых полимерных и композитных материалов, включающих наноразмерные структуры и частицы, может быть повышена эффективность преобразования энергии.

В настоящей работе проведены исследования влияния внешнего магнитного поля на ток короткого замыкания вольт-амперной характеристики объемного гетероперехода P3HT/PCBM/CoPc NWs. Получение нанолент осуществлялось методом физического градиентно-температурного осаждения из паровой фазы (TG-PVD) [3]. Средняя высота нанолент, состоящих из стопок молекул фталоцианина кобальта

составила ~ 137 нм. Пленка с объемным гетеропереходом с нанолентами была получена на поверхности стекла с ITO методом spin-coating. Для проведения электрических измерений методом термического испарения в вакууме на поверхность пленки наносился алюминиевый электрод. Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводилось на потенциостате-гальваностате P20X. Для исследования влияния магнитного поля на фотоэлектрические характеристики образец помещался между полюсами электромагнита.

MFE (MFE – magnetic field effect) рассчитывался согласно методике [4]. На рис. 1 приведены зависимости MFE в P3HT/PCBM и P3HT/PCBM/CoPc NWs.

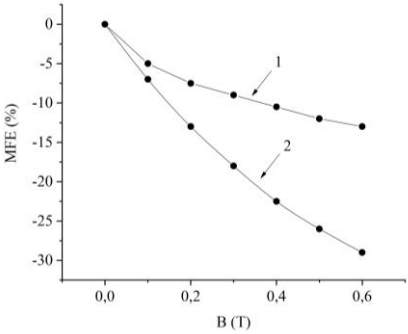


Рис. 1. Зависимости MFE

Из рис. 1 видно, что при увеличении магнитного поля от 0 до 0,6 Т в полимерной пленке P3HT/PCBM наблюдается уменьшение тока короткого замыкания на 13 %, в тоже время, при добавлении нанолент CoPc в гетеропереход значение тока короткого замыкания снижается на 29 %. Увеличение отрицательного эффекта магнитного поля при добавлении нанолент связано с ростом дефектности структуры объемного гетероперехода полимерного солнечного элемента.

Список литературы

1. Vidya C., Hoskeri Priya A., Joseph C.M. Structural and optical properties of vacuum coated and annealed copper phthalocyanine (CUPC) thin films // 4th International Conference on Materials Processing and Characterzation (ICMPC). Hyderabad, India, 2015. P. 1770-1775.

2. Brutting W. Physics of organic semiconductors. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.

3. Liu F., Sun J., Xiao S. et al. Controllable fabrication of copper phthalocyanine nanostructure crystals // Nanotechnology. V. 26. No. 22. P. 225601.

4. Yan L., Wu Y., Xu Z., Hu B. Positive and negative magnetic field effects in organic semiconducting materials // Syntetic Metals. 2009.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ЛИВАШВИЛИ, В.В. КРИШТОП, П.В. ВИНОГРАДОВА,
Н.М. КИРЕЕВА, И.С. МАНЖУЛА
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПРЯМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Изложены результаты теоретического моделирования процессов тепломассопереноса в солнечном коллекторе прямого поглощения солнечного излучения. При этом, в качестве рабочей жидкости рассматривается наножидкость, в которой в качестве дисперсной фазы берутся наночастицы. Получена система двух балансных уравнений (уравнений теплопроводности и термодиффузии). В отличии от других моделей, нами учтены вклады от термодиффузионного потока, теплофизические, гидродинамические и оптические коэффициенты принимаются линейно зависящими от концентрации функциями. Исследуемая система решалась численно. Построены графики зависимости КПД коллектора от концентрации наночастиц, коэффициентов теплопроводности и поглощения наножидкости.

A.I. LIVASHVILI, V.V. KRISHTOP, P.V. VINOGRADOVA,
N.M. KIREEVA, I.S. MANGULA
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A SOLAR COLLECTOR OF DIRECT RADIATION ABSORPTION

The results of theoretical modeling of heat and mass transfer processes in a solar collector of direct absorption of solar radiation are presented. In this case, a nanofluid is considered as a working fluid, in which nanoparticles are taken as a dispersed phase. A system of two balance equations (heat conduction and thermal diffusion equations) is obtained. Unlike other models, we take into account the contributions from thermal diffusion flux, thermophysical, hydrodynamic and optical coefficients taken linearly dependent on concentration functions.

Интерес к таким системам достаточно актуален. Имеется ряд публикаций, в которых эта проблематика изучается как теоретически, так и экспериментально [1-4]. Наш подход (рис. 1), в отличии от других исследований, предполагает учет явления термодиффузии (эффекта Соре) и решение нестационарной задачи. Система балансных уравнений (1) – (2)

описывает, на наш взгляд, достаточно полно, процессы тепломассопереноса, происходящие в солнечном коллекторе:

$$C_p p\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(C)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}V(C)\frac{\partial T}{\partial x} + (1-R)\alpha(C)e^{-\alpha(C)y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V(C) + D_t C(1-C)\frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2)$$

$$div\big(V(C)\big) = 0, \quad (3),$$

где T – температура наножидкости, λ – теплопроводность наножидкости, C – концентрация, C_p, p – теплофизические постоянные наножидкости, R – коэффициент отражения падающего излучения, α – коэффициент поглощения излучения, V – конвективная скорость, D, D_t – коэффициенты диффузии и термодиффузии соответственно.

Используя связь конвективной скорости с динамической вязкостью, и опираясь на ряд экспериментальных работ, полагаем конвективную скорость линейной функцией от концентрации. Аналогичными зависимостями от концентрации представлены и все теплофизические и оптические коэффициентные функции в уравнениях исследуемой системы. Численное решение дало возможность получить пространственно-временные зависимости температуры и концентрации как в переходных режимах, так и в установившихся. В дальнейшем авторы предполагают учесть потоки (электрострикционные), вызванные силами, действующими со стороны сил светового поля на наночастицы.

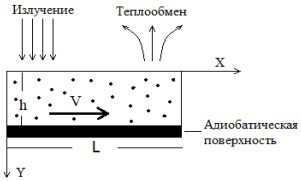


Рис. 1. Геометрия задачи

Список литературы

1. Kumar S., Tien C.L. Analysis of combined radiation and convection in a particulate laden falling film // Heat transfer Phenomena in Radiation, Combustion and Fires, National Heat Transfer Conference, 1989.

2. Tyagi H., Phelan P., Prasher R.S. Predicted efficiency of nanofluid- based direct absorption solar receiver // Journal of Solar Energy Engineering. 2009. V. 131.

3. Otanicar T.P., Phelan P.E., Prasher R.S., Rosengarten G., Taylor A.A. Nanofluid-based direct absorption solar collector // Journal of Renewable and Sustainablw Energy. 2010. V. 2.

4. Balakin B.V., Zhdaneev O.V., Kosinska A., Kutsenko K.V. Direct absorption solar collector with magnetic nanofluid: CFD model and parametric analysis // Renewable Energy. 2019. V. 136. P. 23-32.

УДК 535(06)+004(06)

Г.С. ОМАРОВА, Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ
Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК, СЕНСИБИЛИЗОВАННЫХ ПОЛИМЕТИНОВЫМ КРАСИТЕЛЕМ, В ПРИСУТВИИ НАНОЧАСТИЦ Ag

Изучено влияние локализованного плазмонного резонанса наночастиц Ag на фотовольтаические параметры солнечной ячейки, сенсибилизованной полиметиновым красителем. Показано, что при добавлении НЧ Ag/TiO_2 в пленку полупроводника наблюдается увеличение эффективности работы ячейки почти в 2 раза.

G.S. OMAROVA, E.V. SELIVERSTOVA, N.Kh. IBRAYEV
The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF DYE SOLAR CELLS, SENSITIZED WITH POLYMETHINE DYE IN THE PRESENCE OF Ag NANOPARTICLES

The effect of localized plasmon resonance of Ag nanoparticles on the photovoltaic parameters of a solar cell sensitized with polymethine dye was studied. It was shown that upon the addition of Ag/TiO_2 NPs to the semiconductor film, an almost twofold increase in the efficiency of the cell was observed.

Изучение фотофизических процессов в органических люминофорах и молекулярных ансамблях, проходящих вблизи поверхности плазмонных наночастиц, является одной из актуальных задач современной оптической спектроскопии и люминесценции [1, 2].

В настоящей работе исследовано влияние функциональных сульфогрупп на фотовольтаические параметры солнечных ячеек с добавлением наночастиц (НЧ) Ag. Структурная формула исследуемого красителя показана на рис. 1. Для этого были приготовлены солнечные ячейки по методике работы [3]. В объем пористых пленок TiO_2 были добавлены наночастицы типа «ядро-оболочка» Ag/TiO_2 при концентрации 0, 0,5, 1 и 2 мас %. Вольт–амперные характеристики (ВАХ) солнечных ячеек измеряли при освещении ячеек светом ксеноновой лампы с мощностью излучения 100 мВт/см^2 (табл. 1). В табл. 1 I_{sc} – значения плотности тока короткого замыкания, V_{oc} – напряжение холостого хода,

FF – фактор заполнения, η – КПД работы ячейки, которое вычисляется по формуле $\eta = (I_{sc}*V_{oc}*FF)/P_{irr}$, P_{irr} – мощность света, которым освещается солнечная ячейка.

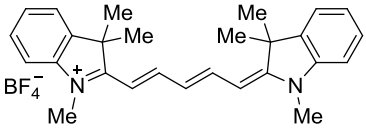


Рис. 1. Структура красителя

Как показали измерения, солнечная ячейка с красителем обладает невысоким КПД, что обусловлено низким значением тока короткого замыкания ячейки. Однако при добавлении НЧ Ag/TiO_2 в пленку наблюдается увеличение эффективности работы ячейки почти в 2 раза.

Таблица 1. Спектрально–люминесцентные параметры ПК на поверхности пленок TiO_2 с различной концентрацией НЧ Ag/TiO_2

Концентрация НЧ Ag/TiO_2, мас%	I_{sc}, мА/см^2	V_{oc}, мВ	FF	η, %
0	0,11	375	0,15	0,06
0,5	0,18	416	0,20	0,15
1,0	0,11	375	0,16	0,07
2,0	0,11	304	0,15	0,05

Это обусловлено, прежде всего, увеличением значений I_{sc} и V_{oc}. Изменение I_{sc} напрямую указывает на увеличение числа носителей заряда в солнечной ячейке, которые формируют данный показатель. Поскольку известно, что процесс переноса электрона от красителя к полупроводнику осуществляется из возбужденного состояния красителя, следовательно, при наличии НЧ Ag/TiO_2 увеличилось и число возбужденных молекул красителя. Результаты исследования спектрально-люминесцентных параметров красителя в присутствии серебра также подтверждают данное предположение. Кроме того, в присутствии НЧ серебра наблюдалось расширение спектральной чувствительности солнечных ячеек, сенсибилизованных исследуемым красителем, что также вносит свой вклад в генерацию носителей заряда в полупроводнике.

Список литературы

1. Geddes C.D., Lakowicz J.R. // J. Fluoresc. 2002. V. 12. P. 121-129.
2. Prasad P. Nanophotonics. NJ: Wiley, Hoboken, 2004.
3. O'Regan B., Gratzel M. // Nature. 1991. V. 353. P. 737-741.

УДК 535(06)+004(06)

А.Ж. ЖУМАБЕКОВ, М.С. КИМ, А.Е. САДЫКОВА,
Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА
*Карагандинский государственный университет им. акад. Е.А. Букетова,
Республика Казахстан*

ВЛИЯНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА TiO_2

Синтезирован нанокомпозитный материал на основе TiO_2 и восстановленного оксида графена. Формирование нанокомпозита было исследовано и подтверждено данными КР и ИК спектроскопии. Изучены электрофизические характеристики синтезированного материала.

A.Zh. ZHUMABEKOV, M.S. KIM, A.E. SADYKOVA,
E.V. SELIVERSTOVA
The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov, Kazakhstan

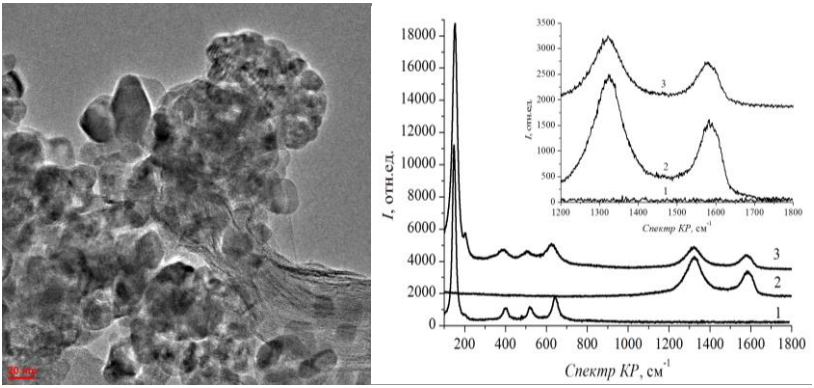
INFLUENCE OF REDUCED GRAPHENE OXIDE ON ELECTOPHYSICAL AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TiO_2

A nanocomposite material based on TiO_2 and reduced graphene oxide was synthesized. The formation of the nanocomposite was investigated and confirmed by Raman and IR spectroscopy. The electrophysical characteristics of the synthesized material were studied.

Применение диоксида титана (TiO_2) в качестве фотокатализатора вызывает постоянный интерес благодаря его эффективности, стабильности и экономичности. Однако использование TiO_2 ограничено его большой энергией запрещенной зоны. Данное ограничение можно частично устранить путем добавления углеродсодержащих соединений и синтеза нанокомпозитного материала.

В данной работе был синтезирован нанокомпозит на основе восстановленного оксида графена (rGO) и TiO_2 гидротермальным методом при различном соотношении компонентов. Исследование нанокомпозита проводили методами просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. Электрофизические свойства были оценены методом импедансной спектроскопии.

На рис. 1*а* показано ПЭМ изображение нанокомпозита TiO_2-rGO после синтеза. Видно, что rGO встраивается в порошок TiO_2. ЭДС анализ подтвердил наличие углерода, титана и кислорода в образцах. КР спектр нанокомпозита (рис. 1*б*) показывает наличие пиков, характерных для TiO_2 и rGO.



а *б*

Рис. 1. ПЭМ-изображение нанокомпозита TiO_2-rGO (*а*) и КР спектр (*б*): TiO_2 (1), rGO (2), – TiO_2-rGO (3)

Измерения электрофизических характеристик нанокомпозита показали, что он обладает улучшенными электротранспортными характеристиками по сравнению с чистым TiO_2. В частности, для диоксида титана величина сопротивления электронному транспорту равна 2194,0 Ом, в то время как для нанокомпозитного материала было зарегистрировано уменьшение этого параметра до 1551,7, 504,1 и 224,7 Ом для соотношений TiO_2-rGO 1:100, 1:20 и 1:10, соответственно.

При исследовании переходных характеристик фототока образцов, полученного при облучении пленок нанокомпозита светом Хе лампы, было зарегистрировано увеличение $I_{ген}$ в 1,5, 2,0 и 2,5 раза для этих же соотношений.

Фотокаталитические свойства TiO_2–GO и TiO_2–rGO оценивались по реакции фотодеградации Метиленового голубого (МГ) в присутствии наночастиц TiO_2 и нанокомпозитов. Сравнение нанокомпозитов показало, что в присутствии восстановленного оксида графена фотодеградация происходила быстрее, чем в присутствии TiO_2.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ, Ю.А. НОВИКОВА
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛЕНКАМИ

Предложены и описаны металлодиэлектрические интерференционные фильтры (ИФ) нового типа. Их особенность в том, что металлические поглощающие плёнки помещены около полуволнового центрального интерференционного слоя и служат для подавления паразитных мод. Такая конструкция позволяет подавлять все излучение выше центрального максимума пропускания. Приведен пример синтеза ИФ, работающего на длине волны 4,3 мкм.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA, Yu.A. NOVIKOVA
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METAL-DIELECTRIC INTERFERENCE FILTERS

Metal-dielectric interference filters (IF) offered for technical implementation. Their peculiarity is that the metal films are placed near the interference layer thickness equal to half the wavelength. This design allows to absorption the radiation in the spectrum above the main transmission maximum. An example of the implementation of an IF with a wavelength of 4.3 microns is given.

ИФ, построенный по схеме Фабри–Перо, образован двумя зеркалами, разделёнными слоем диэлектрика. Зеркалами могут быть пленки серебра, диэлектрические четвертьволновые зеркала, или слои диэлектрика при углах падения больших критического [1-4].

В металлодиэлектрических ИФ обрамляющие зеркала выполнены из пленок серебра. ИФ на основе пленок серебра используются в видимой и ближней ИК областях спектра. Однако их реализация при длинах волн больше 2 мкм невозможна.

Диэлектрические ИФ работают во всех диапазонов спектра. Их недостаток – сложность изготовления. В средней и дальней ИК области широкое распространение получили подложки из кремния. Они пропускают излучение в диапазоне 1,1 - 300 мкм.

На рис. 1 приведен спектр пропускания ИФ на основе диэлектрических пленок на подложке из кремния. Структура фильтра на $\lambda = 4{,}3$ мкм

ПНВ2НВНВН, где П – подложка из кремния, В – пленки ZnSe. Н – пленки BaF_2. Толщины пленок в долях λ/4. Видно, что ИФ практически всё пропускает в диапазоне большего рабочего, т.е. 6 - 7 мкм.

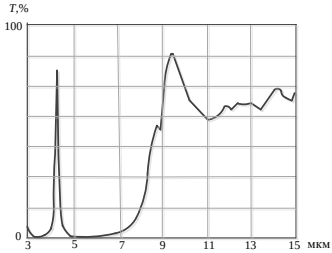


Рис. 1. Спектр пропускания ИФ на диэлектрических пленках

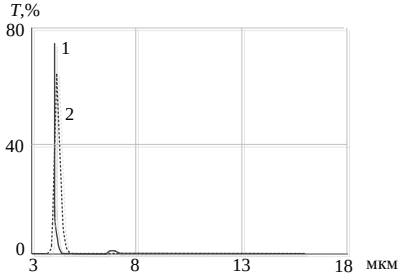


Рис. 2. Спектр пропускания ИФ с металлическими пленками

В работах Ю.В. Троицкого [5] нежелательные моды в лазерах подавляются помещением в резонатор поглощающей пленки в узле стоячей волны. В настоящей работе предлагается использовать металлическую пленку для подавления пропускания в длинноволновой области спектра. Для этого пленка помещается в узлах стоячей волны интерферометра. Нами рассчитаны структуры металлодиэлектрических ИФ для пожарных извещателей. В качестве подложки брался кремний [6] толщиной 0,4 мм. Синтезированы ИФ с различным числом обрамляющих слоев [7]. Спектры приведены на рис. 2.

Предложен новый тип металлодиэлектрических ИФ для средней и дальней ИК области спектра. Они могут использоваться в датчиках открытого пламени и газоанализаторах.

Список литературы

1. Справочник технолога – оптика /под ред. М.А. Окатова. СПб: Политехника, 2004.

2. Котликов Е.Н. Новикова Ю.А., Тропин А.Н. Проектирование и изготовление интерференционных покрытий. СПб: ГУАП, 2016.

3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

4.Гост Р 50785-95. Государственный стандарт Российской Федерации. Фильтры оптические. Дата введения 1996-07-01.

5. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985.

6. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. Оптические константы кремния в диапазоне 30-10000 $см^{-1}$ // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 5. С. 165-168.

7. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А., Коваленко И.И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3 (76). С. 51-59.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. ВАНИН, С.В. ПАНЬКОВА, В.Г. СОЛОВЬЕВ,
А.В. ЦВЕТКОВ, М.В. ЯНИКОВ
Псковский государственный университет

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА Sn/ОПАЛ

Исследована брэгговская дифракция в оптическом нанокомпозиционном материале Sn / опал, полученном методом электротермодиффузии.

A.I. VANIN, S.V. PAN'KOVA, V.G. SOLOVYEV, A.V. TSVETKOV,
M.V. YANIKOV
Pskov State University

OPTICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITE Sn/OPAL

Bragg diffraction in optical nanocomposite material Sn / opal prepared by electro-thermo-diffusion method has been studied.

В работах [1-3] было показано, что введение серебра в опаловую матрицу методом электротермодиффузии приводит не только к смещению максимумов брэгговского отражения фотонного кристалла (ФК) в «красную» область спектра при фиксированных значениях угла падения света и дисперсионному сдвигу максимумов в спектрах отражения ФК в «синюю» область с ростом угла падения, но и к появлению асимметричной формы в спектрах отражения нанокомпозита Ag / опал (рис. 1*а*). Подобный профиль характерен для резонанса Фано [4], возникающего вследствие деструктивной интерференции двух колебательных процессов. В данном случае в роли одного из них, по-видимому, выступает острый брэгговский дифракционный резонанс в ФК, а второй представляет собой широкополосное излучение, рассеянное на случайных нарушениях структуры матрицы опала и неоднородностях (дендритах) в местах проникновения металла в опаловую матрицу.

В настоящей работе метод электротермодиффузии использован для введения в опаловую матрицу наночастиц олова, которое наряду с другими легкоплавкими металлами на протяжении ряда десятилетий вводилось в пористые диэлектрические матрицы (опалы, цеолиты, асбесты, пористые стекла) из расплава под давлением по методу В.Н. Богомолова [5], демонстрируя интересные оптические свойства [6], а также размерные зависимости ряда физических характеристик [7-12].

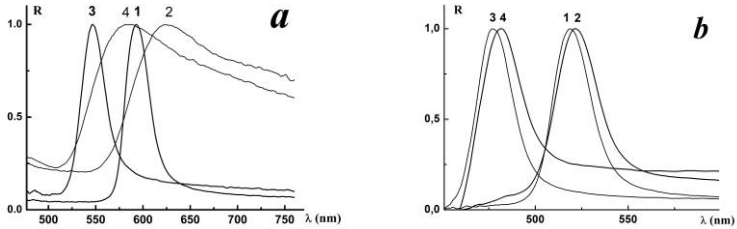


Рис. 1. Нормированные спектры отражения исходной матрицы опала (1, 3) и композита Me / опал (2, 4) при углах падения 15° (1, 2) и 35° (3, 4). Me = Ag [1] (*a*); Me = Sn (*b*)

Введение олова высокой чистоты (ОВЧ-000) в опаловую матрицу с анода при напряженности электрического поля 1,9 кВ/см и температуре 500 К (на 5 К ниже точки плавления «массивного» Sn) в настоящей работе осуществлялось на протяжении 4 ч. В спектрах отражения нанокомпозита Sn / опал (рис. 1*b*) наблюдались те же характерные особенности, что и в спектрах нанокомпозита Ag / опал, но они выражены менее ярко (из-за низкой температуры электротермодиффузии концентрация Sn в нанокомпозите была существенно меньшей, чем концентрация Ag).

Таким образом, нами продемонстрирована возможность модификации оптических свойств нанокомпозита в результате введения легкоплавкого металла в опаловую матрицу методом электротермодиффузии.

Список литературы

1. Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyev V.G., Yanikov M.V. // Environment. Technology. Resources: Proc. of X Int. Scientific and Pract. Conf. Rezekne, Latvia, 2015. V. 1. P. 230-231.

2. Ванин А.И., Соловьев В.Г. // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 140-141.

3. Ванин А.И., Лукин А.Е., Романов С.Г. и др. // ФТТ. 2018. Т. 60. С. 770-773.

4. Fano U. // Phys. Rev. 1961. V. 124. P. 1866-1878.

5. Богомолов В.Н. // УФН. 1978. Т. 124. С. 171-182.

6. Bogomolov V.N., Kholodkevich S.V., Barskii I.Ya., et. al. // Phys. Stat. Solidi (a). 1980. V. 62. P. 43-51.

7. Непийко С.А. Физические свойства малых металлических частиц. Киев: Наукова думка, 1985.

8. Петров Ю.И. Кластеры и малые частицы. М.: Наука, 1986.

9. Kumzerov Y., Vakhrushev S. Nanostructures within Porous Materials // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology / Ed by H.S. Nalwa. American Scientific Publishers. 2004. V. VII. P. 811-849.

10. Шиков А.А., Панова Г.Х., Землянов М.Г. и др. // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 2389-2392.

11. Черняев А.В., Шамшур Д.В., Фокин А.В. и др. // ФТТ. 2016. Т. 58. С. 443-450.

12, Нефедов Д.Ю., Антоненко А.О., Подорожкин Д.Ю. и др. // ФТТ. 2017. Т. 59. С. 351-356.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. БАЛАН, В.В. ИВАНОВ, А.В. КУЗОВКОВ, Е.Л. ХАРЧЕНКО
Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОЕКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЕКТНЫХ НОРМ

В работе делается обзор современного состояния методов повышения разрешающей способности проекционной оптической литографии. Рассматривается применение внеосевого освещения фотошаблона, фазосдвигающих фотошаблонов, а также методик коррекции эффектов оптической близости.

N.N. BALAN, V.V. IVANOV, A.V. KUZOVKOV, E.L. KHARCHENKO
Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd

RESOLUTION ENHANCEMENT TECHNIQUES OF PROJECTION OPTICAL MICROLITHOGRAPHY AT MODERN NODES OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

This paper reviews modern status of methods for increasing the resolution of projection optical lithography. The techniques of off-axis illumination, use of phase-shifting masks, as well as OPC methods are considered.

Как известно, количество элементов производимых интегральных схем удваивается примерно каждые 24 месяца, что ведет к уменьшению проектных норм и применению по всей технологической цепочке (особенно, при литографии) все более точного и дорогостоящего оборудования. Эта тенденция практически не нарушается уже более пятидесяти лет [1, 2].

Разрешающая способность установок проекционной фотолитографии (в данном случае имеется в виду минимальный размер полупериода печатаемых структур) определяется широко известным соотношением

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA},$$

где λ – длина волны экспонирующего излучения, $NA = n \sin\theta$ – числовая апертура объектива (θ – апертурный угол, n – показатель преломления

среды), а k_1 – коэффициент, зависящий от множества факторов технологического процесса [3]. В классической релеевской формуле для разрешающей способности оптических систем этот коэффициент равен 0,61 [4].

Как видно из приведенного соотношения, уменьшение F может быть достигнуто тремя разными способами – использованием излучателей с меньшей длиной волны, улучшением технических характеристик проекционных объективов, а также путем приведения к возможному минимуму значения коэффициента k_1. Первые два способа повышения разрешения чрезвычайно дороги и технически сложны, кроме того, первый способ обычно автоматически влечет за собой второй, приводя к созданию новых поколений литографического оборудования. Третий путь, включающий в себя разнообразные технические и технологические приемы, направленные на уменьшение k_1, как правило, именуется в литературе термином «RET» (Resolution Enhancement Techniques) и включает в себя:

- использование внеосевого освещения фотошаблона;
- введение фазовых элементов на фотошаблоне;
- упреждающую коррекцию топологии фотошаблона с целью минимизации паразитных дифракционных оптических эффектов или т.н. «эффектов оптической близости»;
- метод многократного впечатывания или многократной экспозиции.

Методики RET позволили достичь размера полупериода печатаемых структур, значительно меньшего длины волны рабочего излучения (в настоящее время в подавляющем большинстве литографических установок используется лазерное излучение с длинами волн 365, 248 и 193 нм), внеся существенный вклад в развитие полупроводниковой технологии. Настоящая работа посвящена обзору современного состояния указанных методик.

Список литературы

1. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits // IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter. 2006. V. 11. № 3. P. 33-35.

2. Красников Г.Я., Валеев С.А. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (Обзор, концепция развития) // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. С. 180-201.

3. Mack C.A. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.

4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

УДК 535(06)+004(06)

А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ, А.А. ПЕЧЕНКИН,
Д.В. САВЧЕНКОВ, М.С. ХОЛИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИС ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СО СТОРОНЫ ПОДЛОЖКИ

Моделирование одиночных радиационных эффектов в современных интегральных схемах методом облучения их фемтосекундными лазерными импульсами со стороны подложки позволяет избавиться от многих проблем, связанных с наличием многослойной металлизации поверх приборного слоя. В работе исследуется зависимость эффектов от длины волны лазерного излучения, проходящего через кремниевую подложку различной толщины. Показано, что в данной геометрии облучения предпочтительно использование длин волн в диапазоне 1030…1050 нм.

A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKII, A.A. PECHENKIN,
D.V. SAVCHENKOV, M.S. KHOLINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

SINGLE EVENT EFFECTS SIMULATION IN ICS USING FEMTOSECOND WAVELENGTH-TUNABLE LASER BACKSIDE IRRADIATION

Backside femtosecond laser irradiation addresses many issues in single event effects testing of modern ICs, originating from the presence of metal multi-layers above the active layer. In this work we study how these effects depend on the laser wavelength when irradiating the ICs through the Si substrate of various thickness. It is demonstrated, that with such irradiation geometry, the preferable wavelength range is 1030…1050 nm.

В течение последнего десятилетия лазерное воздействие на микроэлектронные структуры и устройства стало важной частью исследований, направленных на повышение их радиационной стойкости, особенно в области космического приборостроения. Облучение полупроводниковой структуры сфокусированными ультракороткими оптическими импульсами позволяет моделировать эффекты, подобные тем, которые вызывает пролет космических тяжелых заряженных частиц [1], причем для многих современных интегральных схем (ИС)

предпочтительным является использование фемтосекундных лазеров, поскольку длительность лазерного воздействия должна быть значительно короче, чем время проявления электрического отклика элементов внутренних цепей, которое в некоторых сверхвысокоскоростных устройствах составляет около 10 пс.

Однако, большое разнообразие топологий, технических процессов, конфигураций кристаллов ИС и т.д. требует индивидуального выбора длины волны лазера. Кроме того, очень часто из-за наличия оптически непрозрачных слоев металлизации поверх кристалла современных ИС лазерное излучение может доставляться в активные слои только через довольно толстую подложку, что также накладывает определенные ограничения на используемую длину волны.

В данной работе определялись оптимальные длины волн для генерации неравновесных носителей заряда в активном слое при облучении ИС различных типов, выполненных по различным технологическим процессам, фемтосекундным лазером с стороны подложки различной толщины. Для этого регистрировалась электрическая реакция ИС на фемтосекундный лазерный импульс и в зависимости от длины волны измерялись порог тиристорного эффекта либо амплитуда электрического отклика в цепи питания ИС.

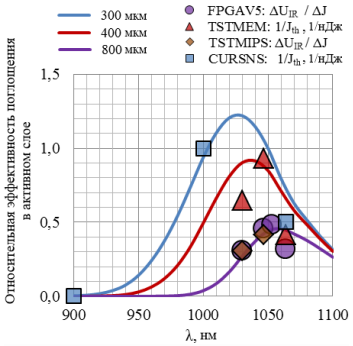


Рис. 1. Результаты экспериментов

Для проведения экспериментов использовалась установка ФЕМТО-Т [2], в состав которой входит оптический параметрический усилитель, генерирующий лазерное излучение в диапазоне длин волны 900…1200 нм, что позволяет тестировать кремниевые структуры при облучении как со стороны приборного слоя, так и с тыльной стороны сквозь подложку. Результаты экспериментов (рис. 1) показали, что для лазерных испытаний выбранных типов кремниевых ИС при облучении со стороны подложки в зависимости от ее толщины предпочтительным является использование длины волны от 1030 до 1050 нм.

Список литературы

1. Fouillat P., Pouget V., McMorrow D. et. al. // Radiation Effects on Embedded Systems, 2007, Springer, P.121.

2. Юшкевич В.В., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б., Диденко Н.В. // VIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 147-148.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ, Н.А. КОМИСАРЧУК
Омский государственный технический университет

ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ РЕФЛЕКТОГРАММАМ

В статье описана программа для автоматизированного определения разновидностей оптических волокон по рефлектограммам на основе анализа характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, а также для оценки бриллюэновского сдвига частоты и натяжения оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV, N.A. KOMISARCHUK
Omsk State Technical University

PROGRAM FOR DETERMINING THE VARIETIES OF OPTICAL FIBER TYPES BY BRILLOUIN REFLECTOGRAMS

A program for automated determination of optical fiber types by reflectograms based on the analysis of the Mandelstam – Brillouin scatter characteristics is described in this paper. A program estimates of the Brillouin frequency shift and fiber strain.

Ранняя диагностика ВОЛС позволяет заблаговременно выявлять участки оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК), которые с течением времени могут привести к деградации и разрушению ОВ, что приведёт к выходу ОК из строя [1].

Для этого можно использовать бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (БОИР – BOTDR), которые позволяют обнаруживать участки ОВ с повышенным продольным натяжением (E_ε) и изменённой температурой (T). После получения картины распределения спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) вдоль световода вычисляется бриллюэновский сдвиг частоты (БСЧ – f_B), а затем строится картина распределения натяжения вдоль ОВ [1].

В программе формируется база данных шаблонных графиков и характеристик РМБ с помощью анализа файла рефлектограммы БОИР.

После запуска программы во вкладке «Открыть» необходимо выбрать для загрузки файл с рефлектограммой БОИР [2]. Программа из файла рефлектограммы формирует профиль СРМБ ОВ, который выводится на экран, и выполняет анализ данных, необходимых для определения характеристик СРМБ [3].

На втором этапе программа определяет и выводит начальную и конечную частоту (в ГГц), а также интенсивность (в дБ) обратно отражённого сигнала РМБ. После нажатия кнопки «Аппроксимировать» полученный профиль СРМБ ОВ сравнивается с шаблонными графиками из базы данных программы на основе специального алгоритма, а с целью «зрительной помощи» при изучении рефлектограмм шаблон, имеющий наилучшее совпадение с загрузочным изображением, подсвечивается зеленым цветом. По мере уменьшения сходства с исследуемой рефлектограммой цвет изменяется от зеленого цвета к красному.

Кроме того, осуществляется определение изменение БСЧ (Δf_B) и натяжения (ΔE_ε) по следующей формуле

$$\Delta f_B\left(E_\varepsilon,T\right)=f_B\left(E_\varepsilon,T\right)-f_{B0}=C_f^\varepsilon\left(E_\varepsilon-E_{\varepsilon 0}\right)+C_f^T\left(T-T_0\right), \qquad (1)$$

где «0» индексы соответствуют нормальным условиям – комнатной температуре и отсутствию продольных растягивающих сил, C_f^ε и C_f^T – коэффициенты связи для соответствующих параметров.

На рис. 1 представлен экран после выделения профиля СРМБ. Также мы наблюдаем полученные значения изменение БСЧ (в МГц) и натяжения (в %) (анализируется ОВ “LEAF”, нагретое до +90° С) [2, 3].

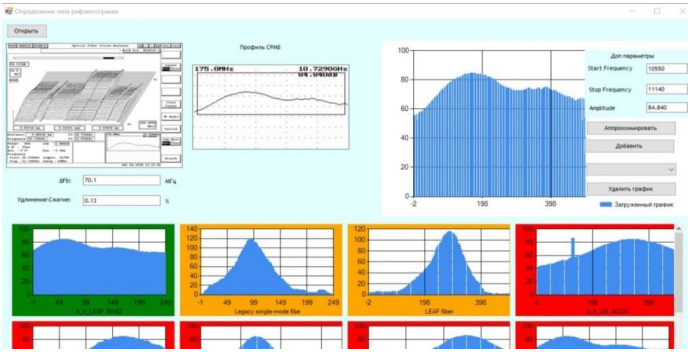


Рис. 1. Экран определения программой разновидности ОВ, БСЧ и уровня натяжения

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И.. Изучение особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в волокнах различных видов // Телекоммуникации. 2019. № 5. С. 21-29.

2. Богачков И.В., Иниватов Д.П., Чобан А.Г. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23734. Программа для автоматического определения типа оптического волокна по бриллюэновской рефлектограмме. Опубл. 14.08.2018.

3. Богачков И.В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019610752. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам. Заявлено 07.11.2018; опубл. 18.01.2019.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ТАВЛЕЕВ, Ю.Д. АРАПОВ, П.В. КУБАСОВ, П.Н. ЯРОЩУК
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

Представленная работа направлена на решение задачи по созданию универсальной устройства поверки интерферометрических измерительных комплексов. Принцип работы создаваемого устройства основан на возникновении нелинейного эффекта – вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) под воздействием лазерного излучения в оптических волокнах. В результате выполненной работы на основе рассмотрения параметров нелинейного эффекта в оптических трактах в различных условиях, сформулированы рекомендации для разработки комплекса и созданию универсальной методики поверки измерительных комплексов типа PDV, VISAR и Фабри-Перо.

A.A. TAVLEEV, Yu.D. ARAPOV, P.V. KUBASOV, P.N. YAROSHCHUK
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

DETERMINATION OF SOUND SPEED IN OPTICAL FIBERS BASED ON THE EFFECT OF STIMULATED MANDELSTAM-BRILLOUIN SCATTERING

The presented work is aimed at solving the problem of creating a universal device for checking interferometric measuring complexes. The principle of operation of the device is based on the occurrence of a nonlinear effect - stimulated Mandelstam-Brillouin scattering (SMBS) – under the influence of laser radiation in optical fibers. As a result of the work performed, based on the consideration of the parameters of the nonlinear effect in the optical paths under various conditions, recommendations are formulated for the development of the complex and the creation of a universal method for testing measuring complexes of the PDV, VISAR, and Fabry-Perot type.

В экспериментах по исследованию ударно-волнового нагружения с использованием диагностики скорости движения ускоряемых объектов на основе лазерно-интерферометрических систем для увеличения уровня полезного сигнала необходимо применять источники лазерного излучения высокой мощности. При этом для увеличения количества каналов регистрации часто используется временное уплотнение с протяженными

линиями задержки сигнала, что может привести к проявлению нелинейных оптических эффектов [1]. В настоящей работе предлагается использовать один из подобных эффектов – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна – чтобы создать аппаратуру для поверки комплексов измерения скорости типа PDV, VISAR и Фабри-Перо.

Создание универсального стенда для диагностики и поверки лазерно-интерферометрических приборных комплексов является актуальной задачей, которая обеспечит возможность калибровки и поверки за счет измерения спектрального сдвига отраженного назад сигнала, обусловленного эффектом ВРМБ в оптическом волокне.

ВРМБ представляет собой нелинейный процесс, который может возникать в оптических волокнах при мощности излучения много меньшей, чем требуется для прочих нелинейных эффектов [2]. Он проявляется в виде генерации стоксовой волны, распространяющейся в обратном направлении и содержащей наибольшую часть начальной энергии. Величина спектрального сдвига зависит от скорости ультразвуковой волны образующейся в оптическом волокне. Поскольку скорость звука в среде является величиной измеримой и известной с высокой точностью, то это можно использовать для калибровки и поверки лазерно-оптических измерителей скорости.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной отработки оптической схемы для наблюдения эффекта ВРМБ при различных условиях при измерении спектрального сдвига на основе гетеродинного принципа. Выполнены оценки для величины скорости звука для оптических волокон с сердцевиной из различных типов материалов. Проведено сравнение полученных данных с расчетными значениями скорости звука в оптических волокнах.

На основании полученных данных сформированы рекомендации по построению поверочного устройства для лазерно-гетеродинных измерительных комплексов.

Список литературы

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.

2. Govind P. Agrawal G. Nonlinear Fiber Optics. Fourth Edition. New York: The Institute of Optics University of Rochester, 2007.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ, А.И. АЛЕКСАНДРОВА
Омский государственный технический университет

ВЫЯВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ РЕФЛЕКТОГРАММАМ

В работе рассмотрены вопросы обнаружения температурных воздействий на одномодовые оптические волокна по характеристикам рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований при различных воздействиях.

I.V. BOGACHKOV, A.I. ALEKSANDROVA
Omsk State Technical University

DETECTION OF TEMPERATURE EFFECTS ON OPTICAL FIBERS BY BRILLOUIN REFLECTOGRAMS

A detection of temperature effects on single-mode optical fibers by the characteristics of a Mandelstam – Brillouin scattering is presented. The results of theoretical and experimental researches at various effects are given.

Оптическое распределённое зондирование, основанное на анализе рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ), является одним из методов ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Для оценки долговечности работы ВОЛС необходима своевременная информация о механических и температурных характеристиках его оптических волокон (ОВ) в проложенных оптических кабелях. Для этого используются бриллюэновские рефлектометры (БОИР), работа которых основана на анализе спектра РМБ (СРМБ). Сдвиг максимума СРМБ, называемый бриллюэновским сдвигом частоты (БСЧ), пропорционален температуре окружающей среды и продольному натяжению [1].

Соотношение между БСЧ (f_B), мощностью обратно отраженного сигнала РМБ (P), температурой окружающей среды (T) и продольным натяжением (E_ε) описывается выражением [1-3]:

$$f_B\left(E_\varepsilon, T\right) = f_{B0} + C_f^\varepsilon\left(E_\varepsilon - E_{\varepsilon 0}\right) + C_f^T\left(T - T_0\right), \qquad (1)$$

где «0» индексы соответствуют комнатной температуре и отсутствию продольных натяжений, C_f^ε = 493 МГц/%, C_f^T = 1.06 МГц/°С (для ОВ G.652 при нормальных условиях) [1-3]. Анализ мульти-рефлектограмм,

полученных в экспериментах при изменениях температуры от –20 °С до +250 °С, показал увеличение мощности обратного сигнала РМБ с повышением температуры:

$$P(t^\circ) = P(t_0^\circ) + 1.0033\Delta t^\circ \text{ или } P(t^\circ)[\text{дБ}] = P(t_0)[\text{дБ}] + 1.0145\left[\text{дБ}/^\circ C\right]\Delta t^\circ . \quad (2)$$

Появление натяжений порядка 0.2 % и выше является «тревожным» событием, которое требует проверки целостности трассы ВОЛС и устранения потенциально опасных факторов. Выявление фактора, вызвавшего смещение БСЧ и изменение натяжения, внесённые именно температурными воздействиями на ОВ, позволяет выделить такие изменения БСЧ и сделать компенсацию для графика натяжения в световоде из-за только продольных растягивающих нагрузок.

После анализа БОИР-рефлектограмм и исключения явных отражательных событий (особенно эффективно это можно сделать при наличии рэлеевской рефлектограммы того же световода) таких, как стыки различных ОВ и т.п., определяются участки ОВ с линейным возрастанием (повышение температуры ОВ) или уменьшением (охлаждение ОВ) мощности обратно отражённого сигнала РМБ вдоль световода, что позволяет найти смещение БСЧ (f_{BT}) относительно f_{B0} :

$$t^\circ - t_0^\circ = \frac{P(t^\circ)/P(t_0^\circ)}{1.0033} = \frac{P(t^\circ)[\text{дБ}] - P(t_0^\circ)[\text{дБ}]}{1.0145\left[\text{дБ}/^\circ C\right]}, \quad f_{BT}\left(t^\circ\right) = f_{B0} + C_f^T\left(t^\circ - t_0^\circ\right). \quad (3)$$

Это позволяет с учётом (1) определить изменение продольного натяжения ОВ при фиксированной температуре:

$$E_\varepsilon = E_{\varepsilon 0} + \left(f_B - f_{B0} - f_{BT}\right)/C_f^\varepsilon . \quad (4)$$

Упрощение определения потенциально опасных участков в ОВ может быть достигнуто при наличии опорных рефлектограмм. Это могут быть рэлеевские рефлектограммы исследуемых ОВ и характеристики РМБ из базы рефлектограмм [1, 3].

Представленные в данном исследовании результаты позволяют на основании анализа бриллюэновских мульти-рефлектограмм выявлять фактор, который оказал преимущественное влияние на натяжение ОВ в исследуемых участках ОВ ВОЛС, и определять «чистое» натяжение ОВ.

Это позволяет повысить эффективность ранней диагностики потенциально опасных участков ОВ в ВОЛС.

Список литературы

1. Bogachkov I.V. // T-comm. 2019. V. 13. No. 1. P. 60-65.
2. Belal M., Newson T.P. // Journal of Lightwave Technology. 2012. V. 30 (8). P. 1250-1255.
3. Богачков И.В. // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 4. С. 184-191.

УДК 535(06)+004(06)

И.В. БОГАЧКОВ, Н.А. КОМИСАРЧУК
Омский государственный технический университет

ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В работе представлена программа для анализа характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна по рефлектограммам. Программа позволяет оценить натяжение оптических волокон и влияние изменений температуры.

I.V. BOGACHKOV, N.A. KOMISARCHUK
Omsk State Technical University

PROGRAM FOR ANALYSIS OF BRILLOUIN REFLECTOGRAMS OF OPTICAL FIBERS

A program for analyzing of the Mandelstam – Brillouin scattering characteristics by reflectograms is presented in this paper. The program allows to estimate the strain of optical fibers and the influence of temperature changes.

Для ранней диагностики оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК), используются бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (БОИР) [1]. БОИР позволяет обнаруживать участки ОВ с повышенным продольным натяжением и изменённой температурой. В БОИР анализируется обратно отражённый сигнал, содержащий компоненты обратного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ). После получения картины распределения спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) вдоль световода (3D-БОИР рефлектограмма распределения СРМБ) определяется бриллюэновский сдвиг частоты (БСЧ – f_B). После этого строится картина распределения натяжения вдоль ОВ [2].

В представленной программе используется собственная база данных эталонных графиков и характеристик РМБ, которая формируется с помощью анализа файла рефлектограммы БОИР [3]. После загрузки графика необходимо нажать кнопку «Аппроксимировать». Далее полученный профиль СРМБ ОВ сравнивается с эталонными графиками из базы данных программы на основе специального алгоритма, и шаблон, имеющий наилучшее совпадение, подсвечивается зеленым цветом. Также программа выводит начальную, конечную частоту и амплитуду в максимуме. Далее следует активировать вкладку «Мульти», после чего

необходимо загрузить файл с изображением мультирефлектограммы БОИР. Необходимая для анализа область автоматически «вырезается» программой, и после этого формируются частотный график СРМБ ОВ, графики натяжения и уровня обратно отражённого сигнала, которые выводятся на экран, и используются для дальнейшего анализа. Также отображается температура («Т0»), принимаемая за начальную (рис. 1).

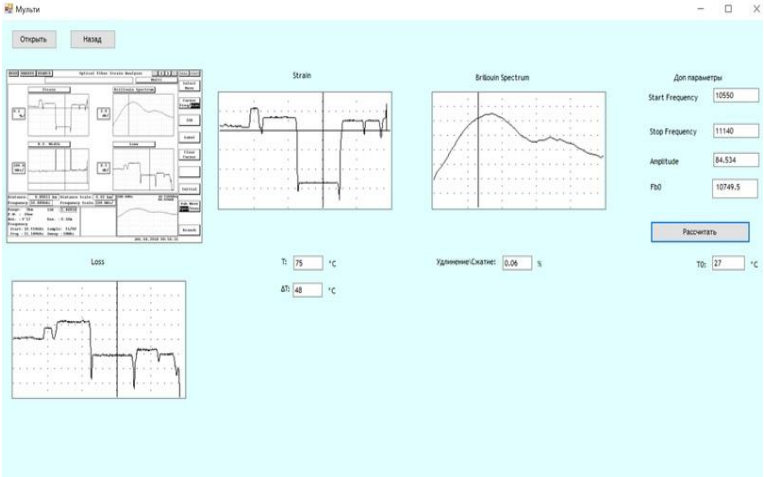


Рис. 1. Экран определения программой БСЧ, температуры и уровня натяжения

После нажатия кнопки «Рассчитать» для участка ОВ, файл которого загружен, производится вычисление изменения БСЧ относительно начального, и далее рассчитывается натяжение ОВ, а также находится температура исследуемого ОВ и её изменения («ΔТ») относительно начальной («Т0»). При изменениях значения «Т0» после нажатия кнопки «Рассчитать» можно сделать перерасчет разницы температур ОВ и натяжения. Электронный ресурс апробирован в ОмГТУ при выполнении научно-исследовательских работ по ранней диагностике ВОЛС [2, 3].

Список литературы

1. Богачков И.В. Классификация факторов, вызывающих изменение натяжения оптических волокон, на основании бриллюэновских рефлектограмм // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 4. С. 184-191.

2. Bogachkov I.V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // Journal of Physics: Conference Series, 2020.

3. Богачков И.В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019610752. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам. Заявлено 07.11.2018; опубл. 18.01.2019.

УДК 535(06)+004(06)

О.Т. КАМЕНЕВ[1,2], Ю.С. ПЕТРОВ[2], А.А. ПОДЛЕСНЫХ[1]
[1]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*
[2]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДЕФОРМОГРАФ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ГОРНОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Создан прототип волоконно-оптического деформографа на основе интерферометра Маха-Цендера с пассивной фазовой демодуляцией на разветвителе 3 x 3. Проведены экспериментальные исследования деформографа в условиях подземного рудника. Определены характеристики деформографа, разработана методика калибровки.

O.T. KAMENEV[1,2], Yu.S. PETROV[2], A.A. PODLESNYKH[1]
[1]*Far Eastern Federal University, Vladivostok*
[2]*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

FIBER OPTIC STRAINMETER FOR PREDICTION SYSTEMS OF DANGEROUS MOUNTAIN-DYNAMIC PHENOMENA

A prototype of a fiber-optic strainmeter based on the Mach-Zehder interferometer with passive phase demodulation on a 3 x 3 splitter was created. Experimental studies of the strainmeter in the conditions of a subsurface mine were carried out. The characteristics of the strainmeter are determined, and the calibration method is developed.

Разработана платформа для создания взрыво- и пожаро-безопасных, малогабаритных мобильных волоконно-оптических сейсмоприемников и датчиков напряжений горных пород, перспективных для мониторинга процессов приводящих к горным ударам. На базе разработанной платформы создан прототип переносного лазерного деформографа на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера [1]. Деформограф предназначен для применения в системах прогноза и предотвращения опасных горнодинамических явлений (горных ударов и техногенных землетрясений) при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых в районах повышенной геодинамической активности и на больших глубинах. Разработан прототип устройства, установленный на руднике «Николаевский» г. Дальнегорск (рис. 1).

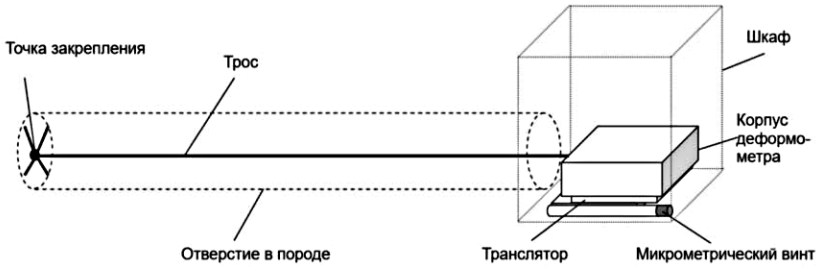


Рис. 1. Схема размещения деформографа на контролируемом объекте

На рис. 2 представлен выходной сигнал прототипа, зарегистрированный во время мониторинга. Аналогичные сигналы регистрировались системой сейсмоакустического мониторинга, размещенной на руднике.

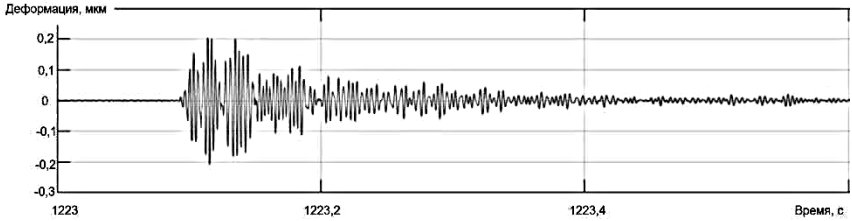


Рис. 2. Сигнал, регистрируемый деформометром на руднике при протекании деформационных процессов в горной породе

Проведённые экспериментальные исследования позволили определить характеристики деформографа:
- измерительная база деформографа – 1…10 м;
- диапазон регистрируемых деформаций – 1 нм… 1 мм;
- пороговая чувствительность – 1 нм.

Диапазон регистрируемых частот – 0 (условно)…1000 Гц.

Список литературы

1. Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Podlesnykh A.A. Use of 3 × 3 coupler in the fiber optic strainmeter based on Mach-Zehnder interferometer // KnE Energy & Physics. VII International Conference on Photonics and Information Optics, 2018. P. 388-392.

УДК 535(06)+004(06)

Р.Ф. ИДРИСОВ
Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПУСКАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СУПЕРСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

Предложена теоретическая модель расчета характеристик спектра пропускания волоконно-оптической суперструктуры на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) с использованием многомодовых уравнений связанных мод. Предлагаемый метод был использован для одновременного определения чувствительности к аксиальной деформации и температуре в диапазоне от 0 до 1200 με и 30 до 90°C.

R.F. IDRISOV
Samara National Research University

EFFICIENT METHOD FOR DETERMINING TRANSMISSION SPECTRUM OF SUPERSTRUCTURE BASED ON IN-FIBER BRAGG GRATINGS

An efficient method is proposed for determining the transmission spectrum characteristics of a fiber optic superstructure based on in-fiber Bragg gratings using coupled mode equations. The proposed method was used for the simultaneous determining sensitivity of axial strain and temperature in the range of 0 to 1200 με and 30 to 90°C.

Основным преимуществом волоконно-оптических суперструктур на основе ВБР [1, 2] при использовании в качестве чувствительных элементов точечных датчиков является их способность одновременно измерять два или более физических параметра, например, деформацию и температуру.

В данной работе была разработана математическая модель для определения спектральных характеристик пропускания суперструктуры, затем был проведен анализ спектральных характеристик при физических воздействиях на волоконную структуру.

Волоконно-оптическая суперструктура состоит из серии участков однородных ВБР и участков с фазовым сдвигом равной длины. Участки ВБР приводят к образованию множественных пиков в спектре отражения.

Оба сегмента образуют звено длиннопериодной волоконной решетки (ДПВР), что в свою очередь, приводит к широкополосному резонансному пику в спектре пропускания.

В коротковолновой области спектра пропускания волоконной суперструктуры образуются узкополосные провалы (пик ВБР) [3], возникающие из-за брэгговского отражения. В длинноволновой области образуется широкополосный провал (пик ДПВР), обусловленный обменом энергии между основной модой сердцевины LP01 и сонаправленной модой оболочки LP05. Оптимизируя параметры волокна, такие как период ВБР и ДПВР, можно регулировать расположение спектральных провалов. При растяжении волоконной решетчатой структуры и температурном воздействии происходит сдвиг резонансных длин волн с разной чувствительностью для определенных мод оптического волокна.

Общая длина волоконной суперструктуры составляет 21,8 мм, состоит из 80 участков ВБР и участков с фазовым сдвигом. Период звеньев ВБР и ДПВР составляет 0,5354 и 545 мкм. При температурном воздействии (рис. 1) сдвиги пиков ДПВР и ВБР составляют 0,064 и 0,009 нм/°С. Сдвиги пиков ДПВР и ВБР при растяжении (рис. 2) равны 1.69 и 0.44 пм/με. Сдвиг длины волны пиков ВБР и ДПВР изменяется линейно при воздействии деформации и температуры. Поэтому сдвиг длины волны одного из узкополосных пиков и сдвиг длины волны пика ДПВР могут быть использованы для одновременного измерения аксиальной деформации и температуры.

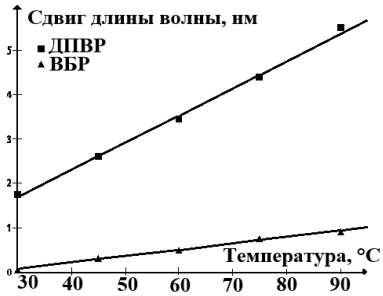


Рис. 1. Сдвиг резонансных длин волн при температурном воздействии

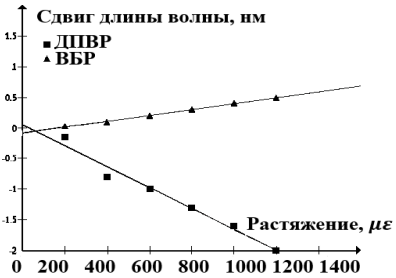


Рис. 2. Сдвиг резонансных длин волн при растяжении

Список литературы

1. Erdogan T. // J. Opt. Soc. Amer. 1997. V. 14. P. 1760-1773.
2. M-Y. Fu, C-M. Lin, W-F. Liu, L. Ai. // Opt. Fiber Technol. 2007. V. 1. P. 16-19.
3. Congzhe Z., Yuanhong Y. et. al. // J. Opt. Soc. Amer. 2016. V. 24. P. 3981-3988.

УДК 535(06)+004(06)

Н.И. ПЕТРОВ
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ДАЛЬНОПОЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СУБВОЛНОВЫХ АПЕРТУР

Предложен дальнопольный метод характеристики субволновых апертур, основанный на зависимости относительной интенсивности распространяющихся мод излучения в заданной среде от размера апертуры. Для измерения относительной интенсивности мод предлагается простая оптическая установка, основанная на использовании компьютерных голограмм и пространственных фильтров.

N.I. PETROV
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

FAR-FIELD CHARACTERIZATION OF SUBWAVELENGTH APERTURES

A far-field method for characterizing apertures based on the relationship between the relative intensity of propagating modes in a given medium and a small aperture illuminated with a light beam is proposed. A simple optical setup based on computer-generated holograms and spatial filters is suggested to measure the relative strength of the modes.

Сфокусированные пучки света представляют значительный интерес из-за их применения в различных областях, таких как микроскопия, оптическая запись информации и т.д. Для определения размера субволновых апертур используется несколько методов. Метод прямого измерения использует сканирующий электронный микроскоп (SEM). Однако SEM является сложным и дорогостоящим для коммерческого использования. Другим методом является определение диаметра апертуры по измерениям углового распределения интенсивности дальнего поля излучения, проходящего через дифракционную апертуру [1]. Полная ширина при половинном максимуме (FWHM) углового распределения интенсивности дальнего поля I (θ) является функцией диаметра апертуры. Однако этот метод не работает для диаметров меньше λ/6, поскольку FWHM становится нечувствительным к диаметру апертуры.

В настоящей работе рассматривается дальнопольный метод характеристики субволновой апертуры, основанный на соотношениях

между относительными интенсивностями распространяющихся мод в среде с известными характеристиками и субволновым диаметром апертуры светового пучка, а также метод, основанный на измерении функции уменьшения осевой интенсивности и ее зависимости от размера апертуры. Подчеркивается связь между относительными интенсивностями мод и факторами Франка-Кондона. Приведены методы измерения относительной интенсивности мод и осевой интенсивности в зоне дальнего поля с помощью простой оптической установки на основе компьютерных голограмм и пространственных фильтров [2]. На рис. 1 представлены относительные интенсивности излучений как функция от размера апертуры.

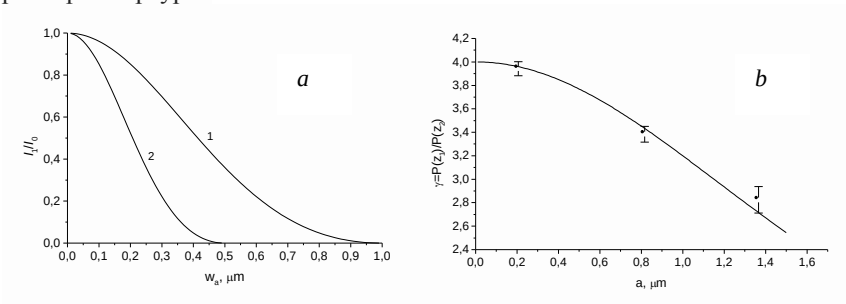


Рис. 1. Зависимости относительных интенсивностей мод от размера апертуры (*a*) и относительные интенсивности полей на различных расстояниях от апертуры (*b*)

Для очень малых апертур ($a << \lambda$) был предложен метод дальнопольного оптического зондирования, основанный на спин-орбитальном взаимодействии света, где поляризационные степени свободы света несут информацию о субволновых объектах [3]. В [4] было показано, что знание только векторной поляризации излучения недостаточно для полного определения поляризационного состояния трёхмерного светового пучка. Следует учитывать дополнительные параметры (компоненты тензорной поляризации). Показано, что векторная и тензорная степени поляризации достаточны для полного описания трёхмерной поляризации, т. е. для различения двух различных поляризованных полей.

Список литературы

1. Obermuller C, Karrai K. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 3406-3408.
2. Petrov N.I., Woo G.M., Lee M.B. // J. Microscopy. 2003. V. 212. Part 2. P. 169-174.
3. Rodrigues-Herrera O.G. et. al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 253601.
4. Petrov N.I. // Laser Phys. 2008. V. 18. P. 522-525.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ГОШЕВ, М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск

ВКЛАД МАГНИТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В СПЕКТР РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АТТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА

В приближении внезапных возмущений, в работе получены выражения для расчётов спектров рассеяния аттосекундного импульса, на нанообъектах и молекулярных анионах с учётом магнитной составляющей электромагнитного поля. Показано, что при взаимодействии аттосекундного импульса электромагнитного поля гауссовой формы с такого рода системами, происходит генерация второй гармоники в спектре переизлучения. В работе приводятся аналитически зависимости парциального спектра от частоты.

A.A. GOSHEV, M.K. ESEEV, D.N. MAKAROV
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Archangelsk

MAGNETIC COMPONENT CONTRIBUTION TO THE SCATTERING SPECTRA OF AN ELECTROMAGNETIC ATTOSECOND PULSE

In the approximation of sudden perturbations, expressions are obtained for calculating the scattering spectra of an attosecond pulse at molecular anions and nano-objects taking into account the magnetic component of the electromagnetic field. It is shown that when an attosecond electromagnetic field pulse of a Gaussian shape interacts with such systems, the second harmonic in the reradiation spectrum is generated. The paper gives an analytic dependence of the partial spectrum on frequency.

Аттосекундная наука [1] изучает движение электронов в их естественном масштабе времени, который обычно порядка аттосекунд (1 а.с. = 10^{-18} с). В последние два десятилетия, генерация изолированных аттосекундных импульсов посредствам генерации высоких гармоник обеспечила мощный инструмент для исследования многих важных физических процессов в аттосекундном масштабе времени. Это привлекает внимание научного сообщества возможностью более глубокого понимания фундаментальных процессов, происходящих в атомах и молекулах, открывает путь для отслеживания динамика

электронов в атомной, молекулярной и физике твердого тела. Позволяет проследить этапы протекания химической реакции.

В работе рассмотрены неупругие процессы в спектре переизлучения УКИ гауссовой формы с молекулярными анионами и произвольными нанообъектами. Длительность импульса τ считается значительно меньше характерного атомного времени для обеспечения применимости приближения внезапных возмущений. Ранее в работах [2-4] были рассмотрены вопросы рассеяния УКИ в приближении потенциала взаимодействия электрона с электромагнитным полем в виде:

$$V(\mathbf{r},\mathrm{t}) = -\frac{1}{c}(\hat{\mathbf{p}}\cdot\mathbf{A}' + \mathbf{A}'\cdot\hat{\mathbf{p}}) + \frac{1}{c^2}(\mathbf{A}')^2 + \mathbf{r}\cdot\mathbf{E}(\mathbf{r},\mathrm{t}), \qquad (1)$$

где из очевидных соображений (малости) пренебрегалось первыми двумя членами формулы (1). Учёт же магнитной компоненты приводит к генерации второй гармоники в спектре излучения, который содержит как когерентную так и не когерентную составляющие. В качестве примера рассматривается излучение на атомарных анионах, а так же кольца состоящего из N_a атомов и N_e электронов в каждом. Приводятся диаграммы направленности излучения в зависимости от числа атомов в системе, ориентации оси кольца и типа ориентации молекулярных анионов (рис. 1).

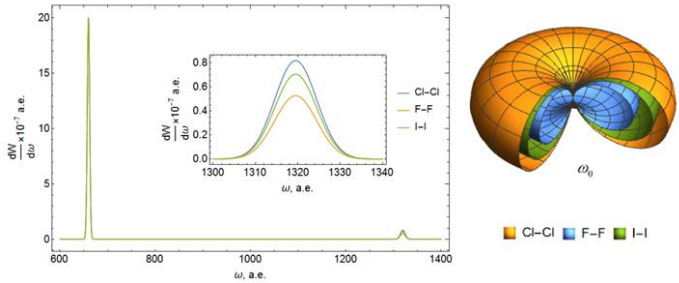


Рис. 1. Спектральная плотность излучения молекулярных анионов хлора, фтора и йода (слева), диаграммы направленности переизлучения ось z по направлению падающего импульса (справа)

Список литературы

1. Corkum P.B., Krausz F. // Attosecond science Nat. Phys. 2007. V. 3. P. 381-387.
2. Matveev. V. I. // J. Exp. Theor. Phys. 2003. V. 97 (5). P. 915.
3. Eseev M.K., Matveev V.I., Yulkova V.M. // Opt. and Spect. 2011. V. 111. P. 330.
4. Makarov D.N., Matveev V.I. // JETP. 2013. V. 115 (5). P. 784-791.

УДК 535(06)+004(06)

В.А. ХАЛЯПИН, А.Н. БУГАЙ[1]
Калининградский государственный технический университет
[1]Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДАХ

Проведено аналитическое исследование устойчивости импульсов в планарном волноводе, распространяющихся в среде с вынужденным комбинационным саморассеянием и фотоионизацией. С помощью метода Ляпунова получен критерий устойчивости таких импульсов.

V.A. KHALYAPIN, A.N. BUGAY[1]
Kaliningrad State Technical University
[1]Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna

ON THE STABILITY OF INTENSE PULSES IN PLANAR WAVEGUIDES

An analytical study of the pulse's stability in a planar waveguide propagating in a medium with stimulated Raman self-scattering and photoionization is carried out. Using the Lyapunov method, a stability criterion for such pulses is obtained.

В настоящей работе предложен подход описания динамики импульсов, распространяющихся в планарном волноводе при учете вынужденного комбинационного саморассеяния и туннельной ионизации. Соответствующее уравнение получено в работе [1]

$$\frac{\partial\psi}{\partial z}+\frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\tau^2}-\frac{\beta_3}{6}\frac{\partial^3\psi}{\partial\tau^3}-i\gamma\psi|\psi|^2+\frac{\gamma}{\omega}\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\psi|\psi|^2\right)+i\gamma T_R\psi\frac{\partial|\psi|^2}{\partial\tau}+i\eta\psi\int_{-\infty}^{\tau}\Delta\Theta(\Delta)-\frac{i\mu}{2}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}=0\ . \quad (1)$$

Здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал, x – ось, вдоль которой дифрагирует импульс, $\tau = t\text{-}z/v_g$ – время в сопутствующей системе координат, v_g –групповая скорость импульса на его центральной частоте ω, η – коэффициент, характеризующий туннельную ионизацию, β_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости (ДГС), β_3 – положительный параметр, определяющий дисперсию третьего порядка, $\mu = c/n_0\omega$, n_0 – показатель преломления среды на нулевой частоте, γ – коэффициент кубической нелинейности, T_R – характеризует вклад вынужденного комбинационного рассеяния, $\Delta|\psi|^2=\left(|\psi|^2-|\psi_{th}|^2\right)$, ψ_{th} – амплитуда сигнала, соответствующая значению пороговой интенсивности туннельной ионизации, Θ – функция Хевисайда.

Коэффициент β_2 положителен, если центральная частота импульса лежит в области нормальной дисперсии групповой скорости и отрицателен в противоположном случае. Анализ динамики параметров импульса проводился на основе метода моментов. В работе рассматривался случай солитонного распространения, когда огибающая импульса сохраняет форму гиперболического секанса

$$\psi = B\operatorname{sech}\left(\frac{\tau - T}{\tau_p}\right)\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{a}\right)^2 + i\left(\phi + \Omega(\tau - T) - C\frac{(\tau - T)^2}{2\tau_p^2} - \frac{\varepsilon x^2}{2a^2}\right)\right], \quad (2)$$

где B – амплитуда сигнала, τ_p – его длительность, φ – фаза и Ω – смещение центральной частоты сигнала,C – параметр, определяющий частотную модуляцию, a – параметр, пропорциональный поперечной ширине сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей, T – временное запаздывание. Все параметры зависят от координаты z. Дифференцируя выражения для моментов по координате z и используя (1), получаем систему уравнений, из которой с учетом (2) находим

$$E = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |\psi|^2 dx d\tau = 2B^2\tau_p a\sqrt{\pi}, \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dz} = -\beta_2\Omega + \frac{\beta_3}{2}\left(\Omega^2 + \left(1 + \frac{\pi^2}{4}C^2\right)\frac{1}{3\tau_p^2}\right) + \frac{\gamma E}{2\omega\tau_p a\sqrt{2\pi}}, \quad (4)$$

$$\frac{d\Omega}{dz} = \frac{4\gamma E}{15\tau_p^3 a\sqrt{2\pi}}\left(T_R - \frac{5C}{4\omega}\right) - \frac{2\eta E}{3\tau_p a\pi}\frac{B}{\psi_{th}}\left(1 - \frac{\psi_{th}^2}{B^2}\right)^2, \quad (5)$$

$$\frac{d\tau_p}{dz} = \frac{\beta_2 C}{\tau_p} - \beta_3\frac{C\Omega}{\tau_p}, \quad (6)$$

$$\frac{dC}{dz} = \left(\frac{4}{\pi^2} + C^2\right)\frac{(\beta_2 - \beta_3\Omega)}{\tau_p^2} + \frac{2\gamma E}{\pi^2\tau_p a\sqrt{2\pi}}\left(1 - \frac{\Omega}{\omega}\right), \quad (7)$$

$$\frac{da}{dz} = -\frac{\mu\varepsilon}{a}, \quad (8)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = -\frac{\mu}{a^2}\left(1 + \varepsilon^2\right) + \frac{\gamma E}{3\tau_p a\sqrt{2\pi}}\left(1 - \frac{\Omega}{\omega}\right) - \frac{\eta E}{\pi a}\frac{\psi_{th}^2}{B^2}\left(\frac{B^2}{\psi_{th}^2} - 1\right)^{5/2}. \quad (9)$$

Здесь E – величина, пропорциональная числу фотонов. Из равенства нулю производных в системе (5) - (9) можно получить стационарное решение. Устойчивость решения линеаризацией системы уравнений (5) - (9) и исследованием характеристического уравнения. Полученное стационарное решение устойчиво, если корни характеристического уравнения мнимые.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-02-00234а).

Список литературы

1. Saleh M.F., Chang W., Holzer P., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 203902.
2. Santhanam J. // Opt. Commun. A. 2003. V. 222, P. 413-420.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ПЛОСКИЙ ПОЛИМЕРНЫЙ ВОЛНОВОД С ДИФРАКЦИОННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ СВЯЗИ НА ИЗОЛИРУЮЩЕМ СЛОЕ

Предложена и реализована полимерная волноводная структура в виде плоского волновода на изолирующем слое, предотвращающем оптические потери от взаимодействия поля моды со слоем ITO, покрывающим подложку. На границе с изолятором сформирована рельефная решетка для возбуждения волноводных мод.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH
Belarusian State University, Minsk, Belarus

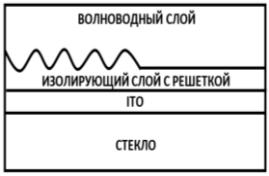
SLAB POLYMER WAVEGUIDE WITH A DIFFRACTION COUPLING ELEMENT ON AN INSULATING LAYER

A polymer waveguide structure in the form of a slab waveguide on an insulating layer that prevents optical losses from the interaction of the mode field with the ITO layer covering the substrate is proposed and implemented. A relief grating is formed at the insulator interface to excite the waveguide modes.

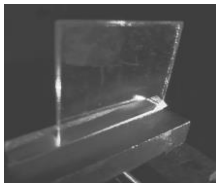
Контакт поверхности волноводного слоя с жидким кристаллом (ЖК) способен обеспечить управление параметрами волноводных мод путем изменения направления директора в электрическом поле. Для реализации этой возможности волноводный слой из материала с достаточно высоким показателем преломления необходимо сформировать на подложке с электропроводящим слоем, которая затем войдет в состав ЖК ячейки, и обеспечить возбуждение волноводных мод внешним лазерным пучком.

В работе [1] нами предложен новый фотосшиваемый высокорефрактивный полимер, образующий волноводные слои с затуханием ~ 1 дБ/см на стеклянных подложках. Его нанесение на подложку со слоем ITO показало, что волноводные показатели преломления мод изменяются незначительно по сравнению с аналогичным слоем на поверхности стекла, но затухание возрастает в десятки раз. Решением этой проблемы мог бы стать слой, изолирующий волноводную пленку от негативного воздействия ITO и выполняющий в волноводной структуре роль подложки. Для возбуждения мод волновода, встроенного в ЖК ячейку, наиболее пригоден дифракционный элемент

связи на границе волноводного и изолирующего слоя. В связи с этим в качестве материала изолирующего слоя был выбран фотосшиваемый полимер с боковыми бензальдегидными группами М-12, используемый нами как ориентант для ЖК [2]. Этот полимер образует слои с показателем преломления $n_i = 1{,}5$, а также, как показано в [3], позволяет записывать голографические решетки УФ излучением $\lambda = 0{,}325$ мкм, проявлять их в виде слабого рельефа и усиливать обработкой в углеводородном растворителе. Сказанное выше позволило предложить схему технологических шагов для изготовления на подложке со слоем ITO волноводной структуры с дифракционным элементом связи (рис. 1*а*).



а



б

Рис. 1. Схема волноводной структуры (*а*) и фотография следа лазерного пучка, введенного в волновод с помощью дифракционной решетки (*б*)

После нанесения изолирующего слоя центрифугированием на подложку с ITO проводится запись голографической решетки, жидкостная обработка слоя, формирующая поверхностный рельеф, сушка и однородное УФ облучение слоя по всей площади. Последняя операция сшивает материал, придавая слою устойчивость к последующему действию растворителя высокорефрактивного полимера. Слой последнего наносится на завершающем этапе. Толщина изолирующего слоя составляла 0,5 мкм и гарантировала практически полное отсутствие взаимодействия поля мод с ITO. Решетка с периодом 0,7 мкм записывалась излучением He-Cd лазера, рельефообразование проводилось по модернизированной методике без стадии проявления, растворяющего часть полимерного материала, сушка осуществлялась при 80 °C в течение 30 мин., однородное УФ экспонирование велось излучением ртутной лампы ДРШ-250. Нанесенный затем слой высокорефрактивного полимера направлял 2 моды, независимое возбуждение которых наблюдалось при направлении на решетку пучка He-Ne лазера ($\lambda = 0{,}63$ мкм) под слегка различными углами (рис. 1*б*).

Список литературы

1. Могильный В.В., Станкевич А.И. // VII Межд. конф. по фотонике и информ. оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 406-407.

2. Mahilny U.V. et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 121-125.

3. Могильный В.В., Станкевич А.И. // VIII Межд. конф. по фотонике и информ. оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 273-274.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. УКОЛОВ[1], Н.А. ЧИРКОВ[1], Р.К. МОЖАЕВ[1,2],
М.Е. ЧЕРНЯК[1,2], А.А. ПЕЧЕНКИН[1]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[2]*ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва*

ГОНИОМЕТРИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОДИОДОВ

Целью работы является разработка автоматизированного стенда для измерения фотометрических характеристик источников излучения на длинах волн от видимого диапазона до ближнего ИК-диапазона.

D.S. UKOLOV[1], N.A. CHIRKOV[1], R.K. MOZHAEV[1,2],
M.E. CHERNIAK[1,2], A.A. PECHENKIN[1]
[1]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[2]*Specialized Electronic Systems (SPELS), Moscow*

GONIOMETRIC STAND FOR PHOTOMETRIC PARAMETERS MEASUREMENTS OF LEDS

The aim of the work is to develop an automated test bench allowing to measure photometric characteristics of light-emitting sources at wavelengths from the visible range to the near-infrared range.

Светодиоды, изготавливаемые на основе гетероструктур AlGaInP и AlGaAs, по условиям эксплуатации могут подвергаться значительному воздействию ионизирующего излучения, например, в условиях космического пространства или на объектах атомной энергетики [1].

Ионизирующее излучение приводит к генерации радиационных дефектов в том числе центров безызлучательной рекомбинации, что приводит в конечном итоге к изменению электрофизических и светотехнических характеристик полупроводниковых приборов и эксплуатационных параметров [2].

Таким образом, требуется точное измерение фотометрических и энергетических характеристик до и после радиационного воздействия. Для этого был разработан автоматизированный гониометрический стенд для измерения фотометрических параметров. Данный стенд позволяет уменьшить относительную инструментальную погрешность и время измерения, а также предоставляет возможность исследования пространственного распределения интенсивности в большом телесном

угле, что позволяет определить световой поток источника излучения. Общий вид моторизированной платформы изображен на рис. 1. Благодаря поворотным платформам 1 и 2 (рис. 2), становится возможным сканирование анизотропных источников излучения в телесном угле больше чем 2π. Позиционер 3 позволяет перемещать источник излучения вдоль оси Z, тем самым позволяет помещать образец в пересечение осей вращения поворотных платформ 1 и 2. Конструкция данного стенда подразумевает автоматизацию измерения параметров. Управление моторизированным гониометром осуществляется микроконтроллером Arduino UNO и драйвером двигателей A4988. Измерения оптической мощности проводятся с помощью Nova II и PD300R-3W (ф.Ophir). Управление гониометром, запись и обработка данных проводится с помощью ПК.

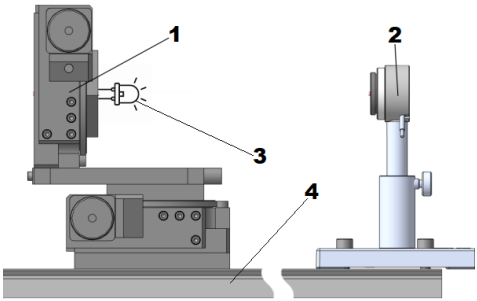


Рис. 1. Общий вид измерительного стенда:
1 – моторизированный гониометр;
2 – измеритель мощности;
3 – исследуемый источник излучения;
4 – оптический рельс

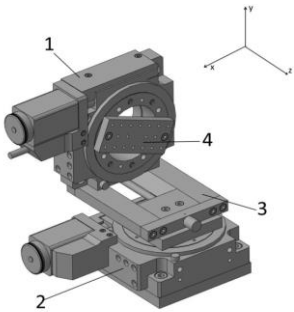


Рис. 2. Моторизированный гониометр:
1 – поворотная платформа в плоскости X-Y;
2 – поворотная платформа в плоскости X-Z;
3 – позиционер вдоль оси Z;
4 – платформа для фиксации образца

Список литературы

1. Polimadei R.A., Share S., Epstein A.S. Performance of Ga1-xAlxAs light-emitting diodes in radiation environments // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. V. 21. No. 6. P. 96-102.

2. Johnston A.H. Radiation effects in light-emitting and laser diodes // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003. V. 50. P. 689-703.

УДК 535(06)+004(06)

В.Л. ЖБАНОВА
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ФОТОКОЛОРИМЕТР С ШИРОКИМ ТЕЛОМ ЦВЕТОВОГО ОХВАТА

Приведены результаты разработки и исследования фотоколориметра на основе цифровой камеры с определенным набором светофильтров, корректирующих спектральную характеристику матрицы под кривые предложенного цветового треугольника с широким телом цветового охвата. Определены цветности объектов сложной формы – страз, на разработанном фотоколориметре.

V.L. ZHBANOVA
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

WIDE BODY PHOTO COLORIMETER

The results of the development and research of a photocolorimeter based on a digital camera with a certain set of light filters correcting the spectral characteristics of the matrix for the curves of the proposed color triangle with a wide color gamut are presented. The colors of objects of complex shape — rhinestones — are determined on a developed photocolorimeter.

Фотоколориметр является разновидностью фотометра. Его применяют для измерения цвета или интенсивности окраски раствора. Участок спектра, используемый в анализе, отличается фильтрами на фотоколориметре [1, 2]. Основной проблемой фотоколориметров является небольшой цветовой охват и возможность работы только с объектами постоянного цветового тона. Целью работы является исследование колориметра для измерений цветовой информации об объектах сложной формы в колориметрической системе с широким цветовым охватом. Предлагается применить матричный фотоприемник для регистрации сигнала сложного изображения [3]. Основой предложенного устройства является набор корректирующих светофильтров, работающих в системе $M_2N_2P_2$ [4].

Структурная схема фотоколориметра включает: 1 – источник света, 2 – бокс со специальным покрытием, 3 – систему юстировки, 4 – штанга, 5 – направляющая, 6 – цифровая камера с набором корректирующих светофильтров, 7 – подставка камеры, 8 – исследуемы объект, 9 – экран. Цепи питания источника излучения и блоки управления на рис. 1 не показаны. Изображение регистрируется устройством захвата и обработки

информации (цифровой камерой) через определенный промежуток времени с применением 4 светофильтров поочередно X1, X2, Y1, Z1, для реализации кривых сложения системы $M_2N_2P_2$. С помощью устройства захвата и отображения информации оператором выделяется рабочая область изображения объекта сложной формы. Далее находится среднее распределение яркости каждой области в программе MATLAB, определяются цветовые параметры объекта в колориметрической системе $M_2N_2P_2$ с наиболее широким телом цветового охвата, неприменяемым в цифровых устройствах. Затем цветовые параметры переводятся в систему CIE XYZ и в равноконтрастную систему CIE LUV.

На основе разработанного фотоколориметра были исследованы светофильтры желтого цвета. Цветовое различие в равноконтрастной системе составило не более 3,5. Также были исследованы стразы желтого цвета сложно формы (рис. 2). При сравнении страза и цветного стекла по идентичности цвета, на колориметре их цветовое различие было не более 4, что входит в предел измерения цветового различия $\Delta E = [0;5]$ и является показателем адекватности проведенных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00176.

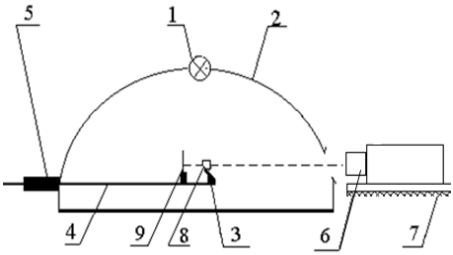


Рис. 1. Схема фотоколориметра

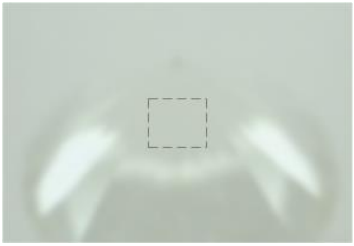


Рис. 2. Снимок страза

Список литературы

1. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб.: Питер, 2009.

2. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.

3. Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б. Экспериментальное исследование системы цветоделения матричного фотоприемника // Оптический журнал. 2019. Т. 86. №3. С. 61-67.

4. Парвулюсов Ю.Б., Жбанова В.Л. Принципы построения колориметра для оценки насыщенных цветов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 5. С. 122-126.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. БЛАНК, С.Д. БОГДАНОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПРАВИЛА РАСПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ КОММУТАЦИИ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ МАССИВОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований матричных фотовольтаических преобразователей, определяющие правила синтеза коммутационных схем, эффективных при работе с мощными коллимированными энергонесущими лазерными пучками. Обсуждаются методы парциального и глобального тестирования коммутационных схем массивов фотопреобразователей. Предложены схемы распределяющей коммутации для коллимированных пучков различного профиля.

A.V. BLANK, S.D. BOGDANOV
Lomonosov Moscow State Univercity

DISTRIBUTION COMMUTATION RULES FOR PHOTOVOLTAIC ARRAYS

Presents the results of experimental studies of matrix photovoltaic converters which determine the rules for the synthesis of switching circuits that are effective when working with powerful collimated energy-carrying laser beams. Partial and global testing methods for switching circuits of photoconverter arrays are discussed. Distribution switching schemes for collimated beams of various profiles are proposed.

Массивы фотовольтаических преобразователей с регулярной структурой традиционно используются в наземных и космических приложениях для преобразования стационарных и пространственно однородных потоков солнечного излучения. Изменение пространственного спектра электромагнитного излучения существенно меняет статистику и динамику физических процессов на поверхности и в объеме фотопреобразующих элементов. Критическими для конвертации энергии становятся зоны затенения поверхности массива, приводящие к блокировке групп элементов и исключении из генерируемой мощности значимой доли падающего потока энергии [1, 2]. Для обхода эффектов затенения разработаны различные приемы активного и пассивного перераспределения падающего на массив потока, приводящие в итоге к квазиравномерному распределению интенсивности по поверхности массива [3].

В экспериментальной работе был разработан и протестирован вариант массива 8 на 8 элементов, распределяющий равномерно токи от неоднородной засветки. Объединим элементы массива в сегменты, а сегменты в модули. Объединение сегментов в модули должно обеспечить необходимый тип симметрии, в случае квадрата - формирование оси симметрии четвертого порядка. Для распределяющего массива коммутация сегментов в модуль создана по правилу включения в модуль по одному сегменту из каждого столбца и каждой строки. Проведены тесты работы этого массива в условиях частичного затенения по строкам и столбцам (рис. 1). Определим парциальные ВАХ, соответствующие затенению строк или столбцов и построим суммарные ВАХ следующим образом:

$$SummVAC_{RShadow} = VAC_{SR1} + VAC_{SR2} + VAC_{SR3} + VAC_{SR4}\,.$$

Согласно предположению о рассеивающих свойствах массива, в условиях однородной засветки выполняется принцип суперпозиции:

$$SummVAC_{RShadow} = 3VAC_{Full}\,,$$

здесь VAC_{Full} – вольт-амперная характеристика, снятая без затенения с полного каскада массива (рис. 2).

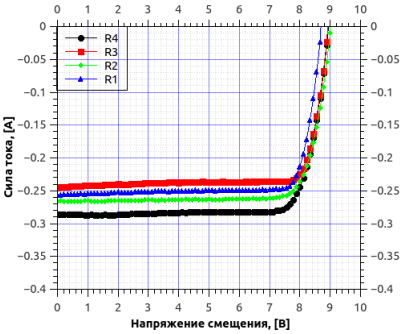


Рис. 1. Семейства парциальных ВАХ рассеивающего массива в условиях засветки с затенением

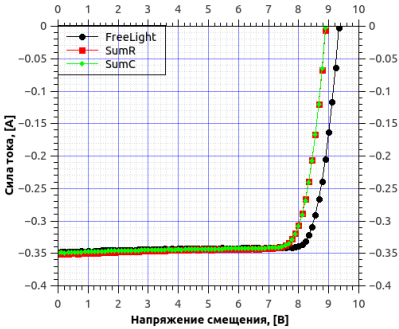


Рис. 2. Тест суперпозиции для затенения строк и столбцов рассеивающего массива

Список литературы

1. Ju X., Pan X. et. al. // Energy Procedia. 2019. V. 158. P. 388-393.
2. Krisha J., Moger T. // Solar Energy. 2019. V. 182. P. 429-452.
3. Blank A., Bogdanov S. et. al. // Journal of Radio Electronics. 2019. V. 11. P. 1-27.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. БУСУРИН, С.Г. ШТЕК[1], М.А. ЖЕГЛОВ[1],
К.А. КОРОБКОВ, Р.П. БУЛЫЧЕВ
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
[1]АО «ГосНИИП», Москва

РАЗРАБОТКА КОНТУРА «ГРУБО-ТОЧНОЙ» СТАБИЛИЗАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЙ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

Разработана структура микро-опто-электромеханического преобразователя линейных ускорений компенсационного типа. Предложен контур «грубо-точной» стабилизации положения чувствительного элемента. Разработан макетный образец, и проведено полунатурное моделирование работы преобразователя на оптическом туннельном эффекте.

V.I. BUSURIN, S.G. SHTEK[1], M.A. ZHEGLOV[1],
K.A. KOROBKOV, R.P. BULYCHEV
Moscow Aviation Institute (National Research University)
[1]JSC «GosNIIP», Moscow

DEVELOPMENT OF THE CIRCUIT OF «ROUGHLY-PRECISE» A SENSITIVE ELEMENT OF THE ACCELERATED CONVERTER WITH OPTICAL READING STABILIZATION

The structure of a micro-opto-electromechanical converter compensation type of linear accelerations is developed. A circuit of "roughly-precise" stabilization of the sensitive element position is proposed. A prototype is developed and a semi-natural study of the operation of the converter on the optical tunnel effect is carried out.

В настоящее время измерение ускорений востребовано во многих прикладных задачах: от построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем до стабилизации конструктивных элементов твердотельных волновых гироскопов. Предложен микро-опто-электромеханический (МОЭМ) преобразователь линейных ускорений, построенный на основе оптического туннелирования [1], модулирующий сигнал за счёт субмикрометровых изгибных деформаций чувствительного элемента (ЧЭ). ЧЭ является кварцевая плоскопараллельная пластина с жёсткой заделкой, в которую введено коллимированное инфракрасное

излучение под углом, близким к критическому, но не превышающим его. Данные о перемещениях ЧЭ детектируются элементами приёма излучения на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Возможное угловое ускорение, действующее вдоль продольной оси чувствительного элемента, вызывает его кручение и вносит погрешность в результаты измерений. При этом кручение может привести к механическому контакту между оптическими деталями преобразователя. Для расширения диапазона измерений и повышения точностных характеристик оптического преобразователя предложено использовать контур комбинированной «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента. Особенность этого контура заключается в совместном использовании элементов электромагнитной обратной связи, обеспечивающих грубое позиционирование ЧЭ, компенсируя изгибные деформации, вызванные измеряемым линейным ускорением, и элементов электростатической обратной связи, точно выравнивающих его поверхность, уменьшая деформацию кручения от побочных угловых ускорений. Сигнал от приёмников информации поступает в блок обработки сигнала, передающий информацию на интерфейс и электромагниты «грубой» стабилизации, а также на схему селекции, формирующую напряжения на соответствующих парах электродов «точной» стабилизации.

Разработаны структурная и функциональная схемы МОЭМ преобразователя линейных ускорений на ОТЭ с контуром комбинированной компенсации деформаций ЧЭ. Предложена узловая дискретная модель ЧЭ, позволяющая учитывать его сложные деформации, в которой ЧЭ представляется плоскостью, состоящей из послойно расположенных взаимосвязанных средних линий. Проведено сравнение динамических свойств систем с электромагнитной и электростатической обратными связями. Разработаны трёхмерные модели различных топологий ЧЭ и проведено исследование его поведения при различных видах ускорений и воздействующих сил. Предложен алгоритм функционирования схемы селекции, позволяющий стабилизировать положение ЧЭ в плоскости. Разработаны трёхмерные модели элементов макета преобразователя. Произведены полунатурное моделирование узла съема и преобразования оптической информации для организации стабилизирующих обратных связей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Busurin V.I., Korobkov V.V., Lwin Naing Htoo, Tuan Phan // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737.

УДК 535(06)+004(06)

В.С. ГОРЯИНОВ, А.А. БУЗНИКОВ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ВАРИАНТ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОМЕТРА РСС

Описывается конструкция модернизированного варианта спектрометра РСС, предназначенного для регистрации спектров природных объектов в полевых условиях. Распределение яркостей в спектре регистрируется линейкой фотодиодов. Управление прибором осуществляет микроконтроллерная схема.

V.S. GORYAINOV, A.A. BUZNIKOV
Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"

A MODERNIZED VERSION OF THE RSS PORTABLE SPECTROMETER

The construction of a modernized version of the RSS spectrometer is described, intended for spectral surveys of natural objects in the field. Spectral brightness distribution is registered by a photodiode array. A microcontroller circuit controls the device.

Ручные спутниковые спектрометры РСС–2, РСС–2М и РСС–3 стали первыми приборами, с помощью которых проводились спектральные наблюдения поверхности и атмосферы Земли из космоса [1]. Хорошее пространственное разрешение и размер поля зрения этих спектрометров позволили использовать их также для наземных съемок [2, 3] и вызвали в дальнейшем ряд конструктивных усовершенствований, состоявших в замене фотопленки на полупроводниковые приемники излучения [4] и создании микропроцессорной системы управления [5].

Малый размер внутренней памяти, ограничивавший автономность предыдущих модификаций спектрометра, и появление на рынке доступных, мощных и простых для программирования микроконтроллеров привели к появлению новой модификации спектрометра РСС. Схема управления этой модификации построена на основе Arduino-совместимой платы MEGA 2560 PRO (микроконтроллер ATmega2560 с тактовой частотой 16 МГц, объем внутренней памяти 256 КБ, объем динамической памяти 8 КБ). Плата генерирует управляющие коды для мультиплексоров, к входам которых подключены

64 элемента фотодиодной линейки, и с помощью встроенных АЦП оцифровывает сигнал с фотоприемников с 10-битной точностью.

Координаты и время проведения съемки определяются при помощи GPS-модуля NEO-6M. Вместе с результатами измерений и информацией о режиме съемки они сохраняются в текстовых файлах на SD-карте. Управление спектрометром осуществляется четырьмя кнопками, информация для пользователя выводится на жидкокристаллический экран.

Спектрометр может питаться от различных типов малогабаритных батарей с выходным напряжением 9 - 12 В.

Оптическая часть прибора спроектирована по автоколлимационной схеме. Для регулировки величины светового потока на входе схемы установлена револьверная диафрагма, положение которой считывается датчиком угла поворота. На основе светоделительного кубика выполнен видоискатель. Калибровка осуществляется наведением на Солнце при помощи поворотного белого экрана. Разложение в спектр выполняет дифракционная решетка с 600 штр./мм, обеспечивающая в сочетании с характеристиками фотоприемника спектральное разрешение не хуже 8 нм в диапазоне 350 - 850 нм. Для проведения поляризационных измерений на объектив спектрометра устанавливается насадка с вращающейся пластинкой-поляроидом. В качестве усовершенствования конструкции рассматривается дополнение прибора шаговым двигателем для вращения поляроида.

Для уменьшения веса корпус спектрометра выполнен из пластика методом трёхмерной печати.

Прибор может использоваться для определения спектральных и поляризационных характеристик природных объектов (растительности, поверхности водоемов, почв и грунтов, снежного покрова) в полевых условиях.

Список литературы

1. Бузников А.А. // Оптический журнал. 2015. Т. 82 (7). С. 114-122.

2. Buznikov A.A, Payanskaya-Gvozdeva I.I., et. al. // Sci. Total Environ. 1995. V. 160-161. P. 285-293.

3. Тимофеев А.А., Бузников А.А. и др. // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2006. Т. 3. С. 155-160.

4. Бузников А.А., Леус В.И. и др. // Известия ГЭТУ. 1995. Вып. 481. С. 3-7.

5. Бузников А.А., Андреева А.В., и др. // Естественные и технические науки. 2009. Т. 40 (2). С. 298-301.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. СИТНИКОВ[1,2], И.А. ХАБИБУЛЛИНА[2], Д.Б. МИТИН[2],
А.А. АШМАРИН[2], А.В. ШЕЛЯКОВ[1]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
[2]*ФГУП «Центр Келдыша», Москва*

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОЗАКАЛЁННЫХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА TiNiCu

Методом сверхбыстрой закалки из расплава получены аморфно-кристаллические ленты из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат.%) толщиной 28 - 30 мкм и шириной около 1,5 мм. Рентгеноструктурные исследования показали, что электроимпульсная обработка приводит к значительному изменению формирующейся кристаллической структуры по сравнению со структурой, полученной стандартной изотермической обработкой.

N.N. SITNIKOV[1,2], I.A. KHABIBULLINA[2], D.B. MITIN[2],
A.A. ASHMARIN[2], A.V. SHELYAKOV[1]
[1]*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*
[2]*Keldysh Research Center, Moscow*

X-RAY DIFFRACTION STUDIES OF RAPIDLY QUENCHED RIBBONS OF TiNiCu ALLOY

Amorphous-crystalline ribbons of the $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (at.%) alloy of 28 - 30 μm thick and 1.5 mm wide are produced by the method of ultra-rapid quenching from the melt. X-ray diffraction studies have shown that electropulse treatment leads to a significant change in the crystalline structure being formed in comparison with the structure obtained by standard isothermal annealing.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития современных технологий является разработка новых материалов и улучшение свойств уже известных. Сплавы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ), в особенности, тонкие пленки и ленты, полученные методом сверхбыстрой закалки из расплава, находят широкое применение для создания различного рода микроустройств, в том числе миниатюрных устройств управления оптическим излучением [1, 2].

Для исследования был выбран сплав $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (ат.%), обладающий высокой склонностью к аморфизации. Сплав получали закалкой из жидкого состояния со скоростью охлаждения расплава около $5*10^5$ К/с в виде непрерывной слоистой аморфно-кристаллической ленты толщиной

28 ÷ 30 мкм и шириной около 1.5 мм. Рентгеноструктурный анализ проводился по фокусировке Брэгга-Брентано с использованием гибридного монохроматора на дифрактометре PANalytical Empyrean в Cu-K_α излучении.

На рентгенограмме с неконтактной (свободной) поверхности ленты после изотермической кристаллизации при 500°C в течение 300 с, как и в состоянии после закалки (исходном), в области 2θ = 58 - 65 градусов наблюдается интенсивные рефлексы структуры типа B19. В области 42-43 градусов расположения основных рефлексов фазы B19 присутствуют лишь небольшие по интенсивности пики. Полученные данные указывают на релаксационную рекристаллизацию кристаллического слоя с сохранением текстурированности. Исследования с контактной стороны ленты показали наличие основных рефлексов фазы B19, расположенных в области 42 - 43 градусов, однако интенсивность пиков значительно меньше, чем с неконтактной поверхности.

После кристаллизации аморфно-кристаллической ленты импульсом тока миллисекундой длительности кристаллографические рефлексы с неконтактной поверхности имеют похожий характер как после изотермической обработки, однако интенсивность пиков фазы B19 практически в два раза меньше. Кристаллографические рефлексы с контактной поверхности несколько отличаются от аналогичной кривой, полученной после изотермической обработки. Наблюдаются рефлексы фазы B19 расположенные как в области 42 - 43 градусов, так и более явные рефлексы в области 58 - 65 градусов, что не наблюдалось после изотермической обработки.

Полученные результаты свидетельствуют о сохранении после изотермической кристаллизации текстурированности поверхностного кристаллического слоя с неконтактной стороны, которая несколько снижается после электроимпульсной термообработки. Рентгенофазовый анализ показал, что после электроимпульсной обработки формируется биморфная структура, часть которой имеет некоторую преимущественную ориентацию структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-02-00805 А.

Список литературы

1. Kohl M., Ossmer H., Gueltig M., Megnin C. // Shap. Mem. Superelasticity. 2018. V. 4. P.127-142.

2. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. // Mater. Des. 2014. V. 56. P. 1078-1113.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. ШОСТКА, Б.В. СОКОЛЕНКО, Д.А. ПОЛЕТАЕВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ НА ОСНОВЕ ТРЁХЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ

В работе рассматривается метод генерации динамических оптических ловушек с пространственно-локализированным распределением интенсивности поля посредством трёхлучевой интерференции Гауссовых пучков с линейной и круговой поляризацией.

N.V. SHOSTKA, B.V. SOKOLENKO, D.A. POLETAEV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

DYNAMIC SPATIAL OPTICAL TRAPS BASED ON TRIPLE GAUSSIAN BEAM INTERFERENCE WITH POLARIZATION

We consider a method for generating dynamic optical traps with a spatially-localized intensity distribution by means of three-beam interference of Gaussian beams with linear and circular polarization.

Вопросу особенностей формирования сложного распределения интенсивности поля, имеющего динамическую структуру, посредством интерференции когерентных лазерных пучков уделено много внимания в последнее десятилетие, особенно, для задач прикладного характера [1]. Среди них можно выделить микроскопию, анализ показателя преломления прозрачных сред и микрофотолитографию. Отдельное внимание уделяется вопросу получения сложных пространственных периодических структур с локализованными минимумами и максимумами интенсивности [2, 3].

В представленной работе продемонстрирован простой подход к формированию пространственного распределения интенсивности оптических пучков с целью создания трёхмерной оптической ловушки. Использование интерференции трёх независимых гауссовых пучков с линейной и циркулярной поляризацией позволяет сформировать квазипериодическую структуру светового поля с локальными минимумами интенсивности, содержащими фазовую сингулярность – оптический вихрь. На рис. 1*a* показано продольное (y, z) распределение интенсивности вдоль направления распространения пучков z. При этом характер картины меняется в зависимости от угла наклона пучков

относительно оси z, перетяжек и поляризации. Интенсивность поля в произвольной плоскости содержит резкие минимумы, рис. 1*б*, фаза которых имеет сингулярность, о чем свидетельствует раздвоение интерференционных линий. Именно в такой области формируется оптическая ловушка, обеспечивающая захват поглощающих частиц.

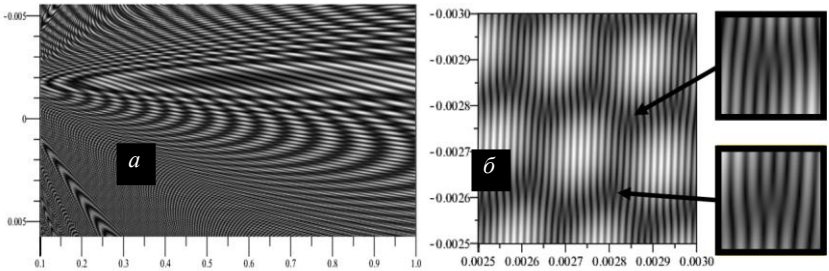


Рис. 1. Сагиттальный срез вдоль оси распространения пучка (*а*), поперечное распространение интенсивности и интерференцией с опорным пучком (*б*)

Стоит отметить, что формируется структурированный массив оптических вихрей с противоположными знаками топологического заряда – дипольными парами. Все поле при этом остается топологически нейтральным, так что знак заряда зависит лишь от выбора отдельного сегмента пучка. Таким образом, мы имеем возможность сформировать тонкую вихревую структуру сингулярных полей без применения световых модуляторов, которая может быть динамически настроена в соответствии с необходимой конфигурацией оптической ловушки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 19-42-910010р_а и частично поддержано Программой развития Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского на 2015 – 2024 годы.

Список литературы

1. Masajada J., Popiolek-Masajada A., et. al. // Opt. Express. 2007. V. 15 (8). P. 5196-5207.
2. Ivanov M.O., Shostka N.V. // J. Opt. 2016. V. 18. P. 075603.
3. Kurzynowski P., Woźniak W.A., et. al. // Optical Society of America. 2012. V. 20 (24). P. 26755.

УДК 535(06)+004(06)

В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, В.Х. ДАНГ, Ш.Х. ВО
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

МОЭМ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Исследована модель рамочного микроопто-электромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов на основе интерферометра Фабри-Перо (ИФП), обеспечивающего линейную функцию преобразования с высокой чувствительностью. Произведено моделирование характеристик МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов на основе ИФП.

V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, V.K. DANG, S.H. VO
Moscow Aviation Institute (National Research University)

ANGULAR VELOCITY MOEM-TRANSDUCER WITH OPTICAL SIGNAL READING BASED ON FABRY-PEROT INTERFEROMETER

The model of frame-type angular velocity microoptoelectromechanical (MOEM) transducer with optical signal reading based on the Fabry-Perot interferometer (FPI), which provides linear transfer function with high sensitivity, is considered. The modeling of characteristics for frame-type angular velocity MOEM-transducer with optical signal reading on base of the FPI is conducted.

МОЭМ-преобразователи угловых скоростей отличаются от микроэлектромеханических (МЭМ) преобразователей использованием оптического метода считывания информации, что позволяет обеспечить гальваническую развязку цепей возбуждения и формирования выходного сигнала. Рассматривается новая модель рамочного МОЭМ-преобразователя угловой скорости, в которой используются биморфные пьезоактюаторы балочного типа для создания первичных колебаний, а параметры вторичных колебаний определяются с помощью оптического считывания. Оптическое считывание параметров вторичных колебаний производится с использованием интерферометра Фабри-Перо [1]. Получена функция преобразования и оценены характерные параметры такого преобразователя. При следующих конструктивных параметрах

пьезо-биморфных балок: материал ЦТС-1 [2]; длина – 5150 мкм; ширина – 2000 мкм; толщина – 142 мкм; напряжение возбуждения U = 40 В; частота f = 2,1 кГц, то, если не учитывать влияние воздушного трения, при измерении величины дополнительной массы M_0 от 150×10^{-6} до 50×10^{-6} кг амплитуда колебаний возрастает от 270 до 670 мкм (рис. 1). Преобразователь обеспечивает измерение угловой скорости в диапазоне 0…2 об./с. Определена зависимость амплитуды вторичных колебаний дополнительной массы от угловой скорости, которая при 2 об./с равна 32,5 мкм. Перемещения ЧЭ, пропорциональные угловой скорости Ω, обрабатываются с помощью ИФП [3]. Такой МОЭМ-преобразователь угловых скоростей имеет линейную функцию преобразования; число пиков пропускания на выходе ИФП К(Ω) зависит от измеряемой угловой скорости и при 2 об./с равно 205, что обеспечивает измерение с погрешностью не более 0,5 % (рис. 2).

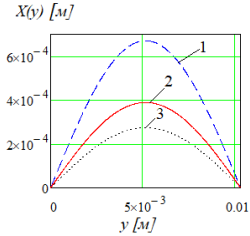


Рис. 1. Зависимость вынужденных первичных поперечных колебаний от длины *y* при вариации нагрузки: $M_0 = 5\times10^{-5}$ кг (1); $M_0 = 10\times10^{-5}$ кг (2); $M_0 = 15\times10^{-5}$ кг (3)

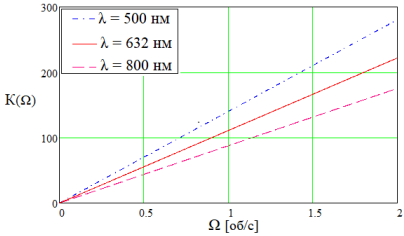


Рис. 2. Зависимости изменения числа пиков поглощения ИФП за период *T* = 23,8 мс от угловой скорости *Ω* при вариации длины волны *λ*

В диапазоне температур от -50 до + 80 ^{0}C максимальное вызванное температурой смещение фазового набега составляет менее 0,01 %. Определено допустимое изменение квазимонохроматического оптического излучения около $1{,}1 \times 10^{-3}$ мкм при угловых скоростях до 2 об./с для погрешности измерения не более 1 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-08-00108).

Список литературы

1. Бусурин В.И., Горшков Б.Г. Коробков В.В., Дьячков В.В. // Датчики и Системы. 2017. № 5. С. 37-43.

2. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006.

3. Бусурин В.И., Коробков В.В., Нгуен Тхань Зыонг, Данг Ван Хуен // Датчики и Системы. 2019. № 3. С. 27-33.

УДК 535(06)+004(06)

Т.Д. ТЫНЫШОВА, Ю.Х. ИСМАНОВ[1]
Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика
[1]Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВХОДНЫМ ЗРАЧКОМ КРУГЛОЙ ФОРМЫ

Рассмотрена математическая модель оптической системы, имеющей входное отверстие круглой формы. В модель введена аберрация общего вида. Предложенная модель позволяет рассматривать влияние различного типа аберраций на простые оптические системы, такие как тонкая линза.

T.D. TYNYSHOVA, Y.K. ISMANOV[1]
Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyz republic
[1]Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

MODELING AN OPTICAL SYSTEM WITH A ROUND ENTRANCE PUPIL

A mathematical model of an optical system having an input pupil of a circular shape is considered. Aberration of the general form is introduced into the model. The proposed model allows us to consider the effect of various types of aberrations on simple optical systems, such as a thin lens.

Если для освещения объекта используется некогерентное освещение, то преобразующая оптическая система должна рассматриваться как линейная относительно интенсивности света система [1-6]. Передаточная функция оптической системы в этом случае имеет вид:

$$\Omega(\xi,\eta)=\frac{\iint\limits_{\infty} Z\left(\mu-\frac{\lambda d_2\xi}{2},\tau-\frac{\lambda d_2\eta}{2}\right)Z\left(\mu+\frac{\lambda d_2\xi}{2},\tau+\frac{\lambda d_2\eta}{2}\right)d\mu d\tau}{\iint\limits_{\infty} Z(\mu,\tau)d\mu d\tau},$$

где $Z(x,y)$ – функция зрачка; λ – средняя длина волны; d_2 – расстояние между линзой и изображением, ξ,η – координаты в частотной области.

При учете аберрации необходимо рассматривать погрешность фазы в точке с координатами (x,y) в плоскости выходного зрачка как $kV(x,y)$, где k – волновое число, а V задает эффективную погрешность длины

пути. Коэффициент пропускания оптической системы, имеющий в общем случае комплексный вид, в этом случае можно записать в виде:

$$Z_j(x,y) = Z(x,y)\exp\left[ikV(x,y)\right].$$

Учет наличия аберраций дает нам следующее выражение для оптической передаточной функции:

$$\Omega(\xi,\eta) = \frac{\iint\limits_{B(\xi,\eta)} \exp\left\{ik\left[V\left(\mu - \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau - \frac{\lambda d_2 \eta}{2}\right) - V\left(\mu + \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau + \frac{\lambda d_2 \eta}{2}\right)\right]\right\} d\mu d\tau}{\iint\limits_{B(0,0)} d\mu d\tau} .$$

Для входного отверстия круглой формы диаметром b функция зрачка может быть записана в виде:

$$Z(x,y) = circ\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{b/2}\right) .$$

Соотношение, описывающее передаточную функцию оптической системы, имеющей входной зрачок круглой формы, имеет вид:

$$\Omega^{кр.}(\xi,\eta) = 4\int_{\theta_2}^{\theta_1} \exp(-ikC\delta x')2\gamma_1 dx' / (\pi b^2) .$$

Здесь

$$\gamma_1 = \sqrt{b^2 - x'^2} - \sqrt{m_x^2 + m_y^2};\ m_x = \frac{\lambda d_2 \xi}{2};\ m_y = \frac{\lambda d_2 \eta}{2};\ C = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}.$$

Список литературы

1. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot interferometer // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4149. P. 213-220.

2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5144- P. 606-610.

3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего свозь решетку // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2017. № 3(57). С. 171-178.

4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 104-106.

5. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия НАН КР. 2015. № 2. С. 20-23.

6. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. № 4(40). С. 194-198.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. ПЕСНЯКОВ, А.В. ВОЗИАНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СРЕДЫ, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ КОНФОРМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ W = SIN(Z)

Получен профиль показателя преломления среды с помощью конформного отображения w = sin(z). С помощью численного моделирования в данной среде были получены эффекты преобразования волнового фронта из плоского в сферический, а также из сферического в плоский.

V.V. PESNYAKOV, A.V. VOZIANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

SOME FEATURES OF MEDIUM WITH REFRACTIVE INDEX BASED ON CONFORMAL MAPPING W = SIN(Z)

The profile of the refractive index of the medium was obtained using the conformal mapping w = sin (z). Transformations of the wave front from planar to spherical one and conversely are presented by the obtained refractive index.

Трансформационная оптика является удобным инструментом для получения диэлектрической и магнитной проницаемостей искусственной, композитной среды с заранее заданными свойствами. С помощью подобных сред возможно создание таких необычных оптических элементов, как многофункциональная линза [1] или оптический волновод [2]. Основными ограничениями в реализации данных сред является то, что диэлектрическая проницаемость среды является тензорной величиной, а также наличие сингулярностей (точек, в которых показатель преломления стремится к бесконечности или к 0). В свою очередь, полученный с помощью конформных отображений профиль показателя преломления является комплекснозначной функцией, а не тензорной величиной.

В теории конформных отображений используют две комплексных плоскости (P_1 и P_2) или, как принято их называть с точки зрения трансформационной оптики, два пространства: физическое $z = x + iy$ (P_1) и виртуальное $w = u + iv$ (P_2). Как было показано в работе [3], чтобы получить профиль показателя преломления, соответствующий данному отображению, необходимо продифференцировать конформное отображение w(z), согласно формуле $n = |dw/dz|\, n'$, где n' – это показатель преломления в виртуальном пространстве.

В данной работе был получен профиль показателя преломления с помощь конформного отображения w = sin(z). На рис. 1 и 2 представлены результаты трассировки лучей в исследуемой среде. Полученные среды являются периодическими, что видно на рис. 1. Источник лучей расположен на прямой y = -3. Можно заметить, что лучи сходятся приблизительно в одной точке на оси OX и далее волновой фронт восстанавливается до исходного плоского.

На рис. 2 нижняя полуплоскость заполнена исследуемой средой с показателем преломления n, в то время как верхняя полуплоскость заполнена воздухом. Видно, что волновой фронт после прохождения границы двух сред становится сферическим. Соответственно, если поместить точечный источник вблизи границы исследуемой среды, то часть излучения, прошедшего в среду, будет обладать плоским фронтом. Аналогично по рис. 1 можно сделать вывод, что излучение от точечного источника, расположенного на оси OX, будет направлено вдоль оси OY и обладать плоским волновым фронтом.

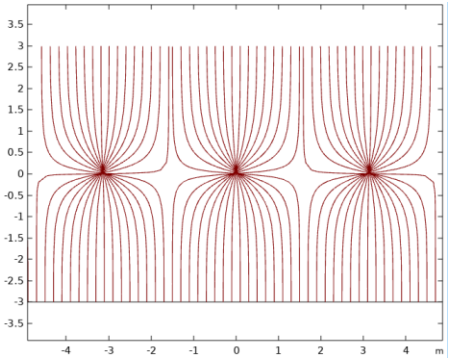


Рис. 1. Трассировка лучей в исследуемой среде

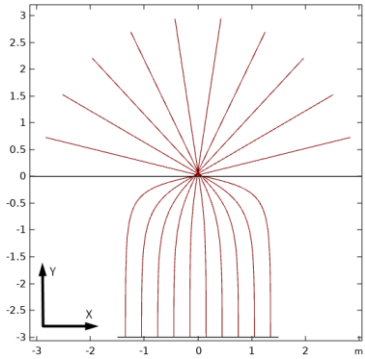


Рис. 2. Трассировка лучей при наличии среды только в нижней полуплоскости

Список литературы

1. Lu C., Mei Z.L. // Optics Express. 2015. V. 23. № 15. P. 19901-19910.
2. Tao S., Zhou Y., Chen H. // Physical Review A. 2019. V. 99. № 1. P. 013837.
3. Leonhardt U. // Science. 2006. V. 312. № 5781. P. 1777-1780.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ЗЕМЦОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ,
Т.Ш. ФАЗЛИЕВ, И.Ж. ХАФИЗОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЦИФРОВАЯ ПОСТДЕТЕКТОРНАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА С- И Х-ДИАПАЗОНОВ

В работе приведён метод линеаризации аналогового оптического тракта при помощи дополнительной цифровой постобработки выходного сигнала. Представлены значения калибровочного коэффициента для различных выходных напряжений.

D.S. ZEMTSOV, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV,
T.S. FAZLIEV, I.Zh. KHAFIZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIGITAL POST-DETECTOR LINEARIZATION OF C- AND X-BAND OPTICAL LINK

Linearization method of analogue optical tract according to additional digital post-detector processing is presented in the article. Also calibration coefficient values for different voltages are included in the article.

Как правило, параметрами, характеризующими нелинейность аналогового оптического тракта, являются точки пересечения интермодуляции второго и третьего порядка двухтонового сигнала [1]. Данные параметры сравнительно просто измерить, они приводят к несложным расчетам и дают наглядную оценку уровня продуктов нелинейных искажений.

Оптические методы обработки сигналов предъявляют все большие требования к линейности системы [1-3], что в свою очередь требует устранения нелинейных искажений. Одним из возможных методов линеаризации является постобработка выходного сигнала, содержащего продукты интермодуляции третьего порядка, путем домножения на калибровочный коэффициент, зависящий от величины выходного сигнала.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Значения основной частоты выбирались в диапазоне 6 – 12 ГГц (отстройка по частоте составляла 10 МГц). Мощность на выходе каждого из

синтезаторов варьировалась от 12 до 16 dBm. Сигнал регистрировался широкополосным PIN фотоприемником ДФДМШ40-012. Дальнейшая обработка проводилась с помощью осциллографа DSAZ334A. Источником света являлся лазер ДМПО155-21. Излучение лазера модулировалось при помощи модуляторам Маха-Цандера EOspace 1x2 Dual-Output Modulator.

Для сигнала на частоте 6 ГГц был получен «теоретический» спектр, содержащий только основные гармоники, и «экспериментальный» спектр с нелинейными искажениями. На основе этих данным был получен калибровочный коэффициент, зависящий от выходного сигнала. Далее выходной сигнал на частоте 8 ГГц был домножен на полученный коэффициент. Как результат, в спектре полученного сигнала отсутствовали нелинейные искажения третьего порядка. Значений калибровочного коэффициента для различных значений выходного напряжения приведены на рис. 2.

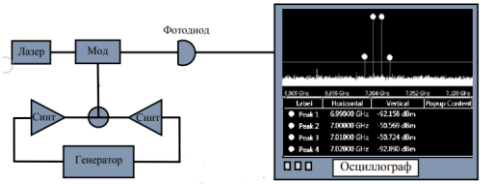


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

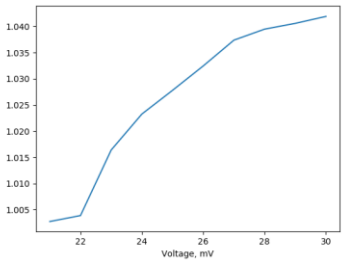


Рис. 2. Зависимость калибровочного коэффициента от напряжения

Список литературы

1. Поляков А.Е. Методика измерения *IP*2 и *IP*3 двухтонового сигнала // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 2. С. 54-63.

2. Urick V.J. Fundamentals of Microwave Photonics. Wiley, 2015.

3. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2.

УДК 535(06)+004(06)

Г.С. РОГОЖНИКОВ, В.В. РОМАНОВ, И.В. МИШИНА
РФЯЦ - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧЕРЕЗ СВОБОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО ПОСРЕДСТВОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВИДИМОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Показан способ передачи изображений объектов через свободное пространство, основанный на пространственно-временной модуляции излучения видимого диапазона, осуществляющего фронтальную подсветку объекта, и терагерцового излучения, осуществляющего тыльную подсветку объекта. Данный способ позволяет повысить информативность передаваемого изображения в случае возникновения между передатчиком и приемником препятствий, непрозрачных или частично прозрачных для излучения видимого диапазона.

G.S. ROGOZHNIKOV, V.V. ROMANOV, I.V. MISHINA
RFNC - All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

TRANSMISSION OF IMAGES VIA FREE SPACE BY MEANS OF SPATIAL TEMPORAL MODULATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF VISIBLE AND TERAHERTZ RANGES

We present the method of image transmission via free space based on the spatio-temporal modulation of electromagnetic radiation of visible range that illuminates the front side of the object and terahertz range that illuminates the rear side of the object. Such method improves the self-descriptiveness of the image in case of opaque or semi-opaque obstacles between the transmitter and the receiver.

Передача изображений предметов через свободное пространство может быть организовано различными традиционными способами [1, 2], однако все они становятся неприменимыми в случае появления между приемником и передатчиком непрозрачных или частично непрозрачных для видимого излучения сред или объектов, таких как туман, дымка, турбулентные газовые потоки, неметаллические конструкции, попадающие в поле зрения приемника. Для решения данной проблемы

предлагается к основному источнику подсветки (в нашем случае лазерному), добавить источник терагерцового излучения, которое способно проникать через бо́льшую часть препятствий.

Для повышения информативности передаваемых изображений была выбрана следующая схема: источник лазерного излучения (λ = 532 нм) осуществлял фронтальную подсветку объекта. Терагерцовое излучение (λ = 2.14 мм) коллимировалось телескопом из внеосевых параболических зеркал и осуществляло тыльную подсветку объекта. При этом перед объектом помещался пространственный модулятор [3] в виде набора масок, размещенных на двух соосных вращающихся дисках. Приемник терагерцового излучения представлял собой одноэлементный пироэлектрический детектор, а лазерного излучения – CCD камера, оснащенная объективом-трансфокатором. Временная модуляция излучения подсветки выбиралась из соображений соотношения между временем построения и обработки изображения и его качеством. Совмещение сигналов от пироприемника и CCD-камеры для получения информативного контрастного изображения осуществлялось при помощи специального ПО.

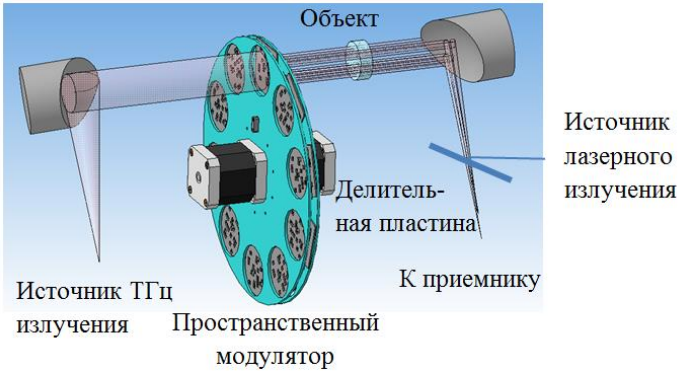


Рис. 1. Схема подсветки объекта

Список литературы

1. Хонина С.Н. // Компьтерная оптика. 1998. Вып. 18.
2. Bruning R. et. al. // Journ.Opt. 2016. V. 18. No. 3.
3. Rout S., Sonkusale S. // Active Metamaterials. 2017.

УДК 535(06)+004(06)

А.В. СКРИПАЛЬ, С.Ю. ДОБДИН, А.В. ДЖАФАРОВ
Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ АВТОДИНОМ

Исследованы возможности метода гармонической частотной модуляции излучения лазерного автодина для определения абсолютного расстояния. Обсуждаются достоинства метода гармонической модуляции, обусловленные возможностью определения расстояния по результатам измерения амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала. Получены результаты влияния внешней оптической обратной связи на форму сигнала лазерного автодина.

A.V. SKRIPAL, S.Yu. DOBDIN, A.V. DZHAFAROV
Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky

DISTANCE MEASUREMENT OF FREQUENCY-MODULATED SELF-MIXING LASER

The possibilities of the method of harmonic frequency modulation of the radiation of self-mixing laser for determining the absolute distance have been presented. The advantages of the harmonic modulation method due to the possibility of determining the distance from the results of measuring the amplitudes of the spectral components of self-mixing signal have been discussed. The results of the influence of external optical feedback on the waveform of self-mixing laser have been described.

Лазерная автодинная интерферометрия абсолютных расстояний в настоящее время представлена методом частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW) [1]. В последние годы опубликованы статьи, использующие гармоническую модуляцию тока питания лазера [2-4]. В [2] предлагается измерять расстояние по частоте биений. В [3] используется разложение интерференционного сигнала одновременно в ряды Фурье и Бесселя. В работе [4] предложено за счет аппаратной фильтрации продетектированного сигнала повысить точность измерений при гармонической модуляции длины волны лазерного излучения.

Преимущество метода гармонической модуляции связано с отсутствием необходимости регулировки девиации длины волны излучения или расстояния до отражателя. Однако это достигается за счет усложнения процедуры анализа автодинного сигнала, включающей

регистрацию амплитуд спектральных составляющих и выбор пары таких составляющих, которые дают минимальную погрешность. Кроме того, достоинством метода гармонической модуляции является большая точность измерений при небольших расстояниях, когда недостаточная величина девиации длины волны лазерного излучения не позволяет обеспечить большое количество интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения тока лазерного диода.

Однако в автодинных системах при проведении интерференционных измерений важным параметром является уровень внешней оптической обратной связи. В частности, для исключения перескоков мод и уменьшения сдвига частоты излучения лазерного диода, вызванного изменением концентрации носителей заряда в активной области, предложено уменьшать уровень обратной связи [5]. Уровень обратной связи будет также влиять и на вид автодинного сигнала, формируемого при модуляции длины волны лазерного излучения.

Оценка уровня обратной связи может быть проведена, на основе методики разложения автодинного сигнала в ряды Фурье и Бесселя и анализа спектра автодинного сигнала по нескольким наборам его гармоник. Поскольку обратная связь изменяет форму и спектр автодинного сигнала, расчет расстояния будет давать погрешность в определении исходного расстояния до отражателя. Для определения величины погрешности в определении расстояния до отражателя предлагается использовать расчет расстояния по различным наборам спектральных составляющих спектра автодинного сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

Список литературы

1. Norgia M., Magnani A., Pesatori A. // Review of Scientific Inst. 2012. V. 83. Is. 4. P. 045113.
2. Zheng J. // Appl. Opt. 2004. V. 43. Is. 21. P. 4189-4198.
3. Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15. Вып. 3. С. 12-18.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И., Добдин С.Ю. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 17. С. 78-86.
5. Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G. et. al. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2004. V. 53. N. 1. P. 223-232.

УДК 535(06)+004(06)

Ю.В. ЗАЧИНЯЕВ, Ю.А. ГУДКОВА, А.А. ШТОКОЛОВ
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Таганрог

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ VLC И RFID

Приводится пример реализации гибридной системы контроля скорости движения автомобиля на базе технологий связи по видимому свету (от англ, Visible Light Communication, VLC) и технологии радиочастотной идентификации (от англ, Radio Frequency Identification, RFID).

Yu.V. ZACHINYAEV, Yu.A. GUDKOVA, A.A. SHTOKOLOV
Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Taganrog

HYBRID VEHICLE SPEED CONTROL SYSTEM ON THE BASIS OF VLC AND RFID TECHNOLOGIES

An example of the implementation of a hybrid vehicle speed control system based on VLC and RFID technologies is given.

Разработка интеллектуальной транспортной системы (ИТС), позволяющей контролировать растущие потоки «умных» автомобилей, является перспективным направлением. В ИТС может быть реализована подсистема контроля скорости движения транспортного средства.

Существующие подходы к задаче определения скорости имеют недостатки. К ним можно отнести и низкую скрытность, позволяющую использовать антирадары, возможность мошенничества с автомобильными номерами, ограниченный диапазон измерений.

В данной работе приводится пример реализации гибридной системы контроля скорости на основе технологий VLC и RFID.

На дороге размещаются две контрольные точки (метки), с заранее известными координатами и расстоянием d между ними. В данных точках находятся приемные модули VLC, считывающие информацию с передающих модулей VLC, которыми являются светодиодные фары автомобилей. Сначала необходимо определить скорость движения автомобиля v, рассчитываемую по следующей формуле:

$$v = \frac{d}{t_2 - t_1},$$

где t_1 – время преодоления транспортным средством первой метки x_1; t_2 – время преодоления транспортным средством второй метки x_2.

Приемник получает по каналу VLC данные о скорости движения и регистрационный номер автомобиля. Принцип работы подсистемы представлен на рис. 1.

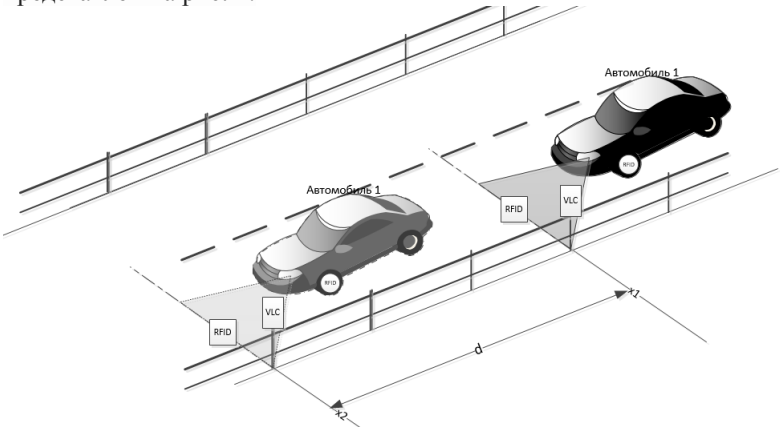


Рис. 1. Подсистема контроля скорости на базе технологий VLC и RFID

Качество передачи данных по оптическому каналу зависит от погодных условий. Так, в [1] сказано, что туманная погода создает плохую видимость на дороге, следовательно использование светодиодных коммуникаций может приводить к искажениям передаваемых данных. Поэтому в описываемой системе применяются вспомогательные метки RFID, работающие по аналогичному принципу.

Помимо определения скорости, данная подсистема может быть расширена для применения системы беспроводной связи как между двумя автомобилями (V2V) [2], так и между автомобилем и другими объектами дорожной инфраструктуры (V2X) [3].

Список литературы

1. Kim Y.H., Cahyadi W.A., Chung Y.H. Experimental Demonstration of VLC-based vehicle-to-vehicle communications under fog conditions // IEEE Photonics Journal. 2015. V. 7. № 6.

2. Yamazato T., Takai I., Okada H. et. al. Image sensor based visible light communication for automotive applications // IEEE Communications Magazine. 2014.V. 52. P. 88-97.

3. Yamazato T. V2X communications with an image sensor // Journal of Communications and Information Networks. 2017. V. 2. № 4.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ БОКОВОГО СДВИГА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предложена оптическая схема интерферометра для регистрации сдвиговых интерферограмм с возможностью изменения величины бокового сдвига. Продемонстрирована перспективность применения такого интерферометра для исследования динамических периодических структур.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

LATERAL SHIFT INTERFEROMETRY FOR THE STUDY OF DYNAMIC PERIODIC STRUCTURES

The optical scheme of interferometer for registration of shear interferograms with possibility of change of value of lateral shift is offered. The prospects of using such an interferometer for the study of dynamic periodic structures are demonstrated.

В работе рассмотрен двухзеркальный интерферометр бокового сдвига, содержащий пару зеркал, установленных параллельно друг другу, и включающий оптическую систему пространственной фильтрации. На рис. 1 приведена оптическая схема интерферометра. Осветительная система включает лазерный источник света Ls и телескопическую систему, образованную рассеивающей линзой L_1 и двухлинзовой склейкой L_2. Данный интерферометр может быть использован для исследования динамических периодических структур. Для визуализации развития во времени макродефекта исследуемой структуры O посредством отверстия в непрозрачном экране SF, установленном в задней фокальной плоскости объектива L_3, выделялась определенная волна, дифрагированная на этой структуре. Все остальные дифрагированные волны задерживались непрозрачным экраном и не создавали помех при формировании сдвиговой интерферограммы. Таким образом, выделенная оптической системой пространственной фильтрации требуемая световая волна коллимировалась объективом L_4 и направлялась на пару зеркал M_1 и M_2, выполняющих функцию оптической системы

формирования пары световых волн сдвинутых в пространстве на требуемую величину.

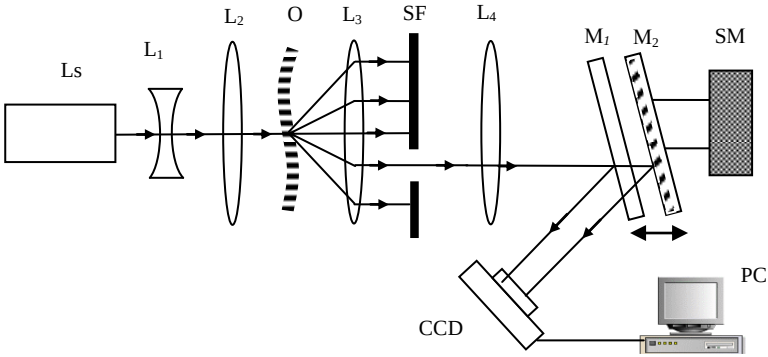


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки для регистрации сдвиговых интерферограмм бокового сдвига. Пояснения: Ls – лазерный источник света, L_1 – рассеивающая линза; L_2, L_3, L_4 – объективы, O – исследуемая периодическая структура, SF – экран; M_1, M_2 – зеркала, SM – шаговый двигатель, CCD – цифровая фотокамера, PC – персональный компьютер

Для обеспечения высокой контрастности интерференционных полос требуется, чтобы интерферирующие световые волны имели равные или близкие по величине интенсивности. Величина бокового сдвига между интерферирующими световыми пучками задавалась перемещением второго зеркала M_2 посредством шагового двигателя SM, таким образом, чтобы отражающие поверхности зеркал всегда оставались параллельными. Интерференционная картина регистрировалась с помощью цифровой камеры CCD и выводилась на экран компьютера PS.

Данный интерферометр был использован для визуализации макродефектов динамической пространственно-периодической структуры, представляющей собой крестообразную, металлическую сетку, поверхность которой подвергалась переменной деформации [1, 2]. Получена серия сдвиговых интерферограмм достаточно высокого качества.

Список литературы

1. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. 2019. Т. 9. № 2. С. 85-93.

2. Авласевич Н.Т., Буть А.И., Ляликов А.М. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 2. С. 34-40.

УДК 535(06)+004(06)

И.П. ГУРОВ, Е.Н. КУЛИКОВА[1]
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]ООО «Ленвендо-М», Санкт-Петербург

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОМЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассматриваются особенности использования методов динамической обработки сигналов в спектральной оптической когерентной томографии на основе фильтрации Калмана. Показаны возможности компенсации влияния дисперсии в среде и повышения быстродействия на основе применения ансамблевого фильтра Калмана.

I.P. GUROV, E.N. KULIKOVA[1]
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Lenvendo-M LLC, Saint-Petersburg

DYNAMIC MULTIDIMENSIONAL INTERFEROMETRIC SIGNAL PROCESSING METHOD IN OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

Application of the dynamic signal processing methods based on the Kalman filtering in spectral optical coherence tomography is considered. Possibilities to compensate influence of light dispersion within an investigated tissue as well as the processing speed increase using the ensemble Kalman filtering are demonstrated.

Методы оптической когерентной томографии (ОКТ) широко используются при исследованиях внутренней микроструктуры различных объектов, в частности, в биомедицине [1]. В спектральной ОКТ сигнал на выходе интерферометра представляет собой суперпозицию интерферометрических сигналов, полученных при отражении от различных слоёв по глубине исследуемого объекта при различных длинах волн. При многократном отражении по глубине исследуемого объекта сигналы спектральной интерференции содержат различные частоты и некогерентно складываются. Ввиду влияния дисперсии света в среде спектральные интерференционные полосы испытывают частотную модуляцию, вследствие чего происходит уширение их спектра и ухудшение разрешающей способности. При получении динамических оценок параметров сигнала при рекуррентной обработке данных на

основе фильтрации Калмана (ФК) возможны компенсация эффекта частотной модуляции, учитываемой в модели сигнала, и повышение быстродействия [2].

В настоящей работе рассматривается метод динамической обработки векторных сигналов на основе ансамблевого фильтра Калмана (АФК) [3], основанного на последовательном методе Монте-Карло и обеспечивающего компенсацию искажений спектра интерферометрических сигналов с дополнительным повышением быстродействия при обработке сигналов в пространстве состояний большой размерности.

Интерферометрический сигнал *A*-скана представляет собой суперпозицию *N* квазигармонических компонентов с изменяющейся частотой

$$s(k) = \sum_{j=1}^{N} a_j \cos\left(2\pi \sum_{l=0}^{k} f_j(l)\Delta k + \varphi_j\right), \qquad (1)$$

где f_j, φ_j – частота и начальная фаза *j*-й гармоники; a_j – значения амплитуд, которые требуется определить при обработке сигнала $s(k)$; k – номер отсчета, соответствующий волновому числу, в диапазоне от 1 до *K*.

Полученные результаты показали, что АФК позволяет определить амплитудный спектр сигнала спектральной интерференции с погрешностью меньшей, чем при использовании традиционных методов на основе преобразования Фурье (ПФ), поскольку АФК позволяет избежать возникновения ложных частотных компонентов при частотной модуляции вследствие влияния дисперсии света в среде, что характерно для методов ПФ, в которых частотные компоненты заданы априорно на ограниченном наборе частот с фиксированными значениями. Другое преимущество АФК заключается в более высокой вычислительной эффективности в сравнении с классическим ФК. Выигрыш в быстродействии составил от 5-ти до 14-ти крат при количестве частотных компонентов *N* в (1) от 100 до 500 соответственно.

Полученные результаты подтверждены экспериментально при получении томограмм реальных микрообъектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10118).

Список литературы

1. Drexler W., Liu M., Kumar A., et. al // J. Biomed. Opt. 2015. V. 19. P. 071412.

2. Волынский М.А., Гуров И.П // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 50-55.

3. Evensen G. // IEEE Control Syst. Magazine. 2009. V. 29. P. 83-104.

УДК 535(06)+004(06)

В.О. ЧЕРЕШНЕВ, С.В. ФРОЛОВ, С.Г. ПРОСКУРИН
Тамбовский государственный технический университет

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОКТ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГИСТОГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПИКСЕЛЕЙ

Приведены результаты исследования кровеносных сосудов человека *in vivo* при помощи оптического когерентного томографа, в ходе которого были построены структурные ОКТ (оптическая когерентная томография) изображения на основе гистограммы распределения интенсивности пикселей областей воздуха, кровеносных сосудов, кожи и крови.

V.O. CHERESHNEV, S.V. FROLOV, S.G. PROSKURIN
Tambov State Technical University

STRUCTURAL OCT IMAGES RECONSTRUCTION BASED ON HISTOGRAMS OF PIXEL INTENSITY DISTRIBUTION

The results of an *in vivo* study of human blood vessels using an optical coherence tomography (OCT) are presented. Structural images were reconstructed using histograms of pixel intensity distribution for blood vessels, skin and blood.

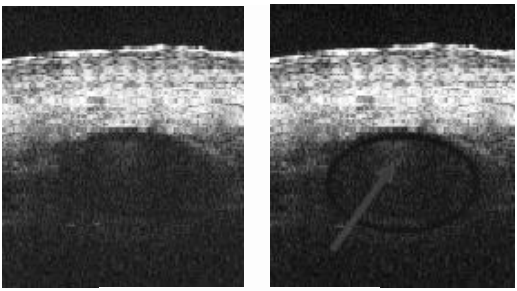
При интраваскулярных исследованиях особый интерес представляет возможность визуализировать структуры стенок кровеносных сосудов и формы аневризм изнутри [1, 2]. Заметим, что визуализация таких структур обычно затруднена в связи с движением и высоким показателем рассеяния крови, μ_s = 60–100 мм$^{-1}$. При исследовании таких биотканей и потоков экспериментально были показаны возможности увеличения глубины когерентного зондирования (ГКЗ) при получении структурных и доплеровских изображений [3].

Для решения данной задачи были рассчитаны локальные изменения интенсивности соответствующих пикселей структурных изображений для определения средних значений и разброса свойств рассеивателей в рассматриваемой точке биоткани посредством построения гистограмм интенсивности пикселей областей воздуха, кровеносных сосудов, кожи и крови.

Полученные гистограммы усреднены для минимизации погрешности и аппроксимированы методом наименьших квадратов посредством гамма-распределения. Различия среднего значения коэффициентов α/β

соответствующих графиков гамма распределения, которое составило, $\alpha/\beta = 2.7\cdot10^{-4}$ для области крови и $\alpha/\beta = 7.0\cdot10^{-4}$ для кожи, $\alpha/\beta = 8.0\cdot10^{-4}$ для воздуха. Точность аппроксимации составило $R^2 \sim 0.95$, что демонстрирует количественное соответствие обработанных данных.

Для построения структурного изображения, описывающего области воздуха, крови, биоткани и области, ниже ГКЗ, была разработана программа на основе алгоритма скользящего ящика и гистограммы распределения пикселей, производящая сравнение исследуемой области размером 3 x 3 пикселя с полученными данными о распределении соответствующих структур. Результат увеличения ГКЗ и реконструкции кровеносного сосуда на всю его глубину представлен на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Структурное ОКТ изображение кровеносного сосуда человека *in vivo* (*а*); овалом показано место стенки сосуда, стрелкой изображение крови (*б*)

Дальнейшая работа будет связана с расширением спектра возможностей представленного алгоритма, например, обработки 3D изображений и анализа С-сканов с использованием графических процессоров. Также планируется исследование использования настоящего алгоритма для анализа фантомов биологических тканей.

Список литературы

1. Черешнев В.О., Романенко И.М., Кулешов И.В., Проскурин С.Г. Дифференциация структур кожи, кровеносных сосудов и крови посредством построения вариационной матрицы ОКТ изображения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 319-323.

2. Проскурин С.Г., Фролов С.В., Визуализация кровеносных сосудов при помощи оптической когерентной томографии // Медицинская техника. 2012. № 3. С. 9-14.

3. Проскурин С.Г. Растровое сканирование и усреднение для уменьшения влияния спеклов в оптической когерентной томографии // Квантовая электроника. 2012. № 6, С. 495-499.

УДК 535(06)+004(06)

В.О. ЧЕРЕШНЕВ, С.Г. ПРОСКУРИН
Тамбовский государственный технический университет

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СТРУКТУР РАЗЛИЧНЫХ ТКАНЕЙ ОКТ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ИНТЕНСИВНОСТИ ПИКСЕЛЕЙ

Описываются результаты исследования структурных ОКТ (оптическая когерентная томография) изображений кожи и кровеносных сосудов человека *in vivo*, в ходе которой были построены гистограммы интенсивностей пикселей структурного изображения, демонстрирующие различия в распределении вероятностей и среднего значения α/β соответствующих подгонок гамма-распределения.

V.O. CHERESHNEV, S.G. PROSKURIN
Tambov State Technical University

DIFFERENTIATION OF SKIN STRUCTURES, BLOOD VESSEL AND BLOOD OCT IMAGE BY ANALYSIS OF PIXELS INTENSITY

A study results of optical coherence tomography (OCT) structural images of human skin and blood vessels *in vivo* are presented. The histograms of pixel intensities of the images, showing differences in the probability distribution and the average value of α/β of the corresponding gamma distributions are presented.

При проведении дерматологических исследований особый интерес представляет возможность визуализации подкожных структур биообъекта, например кровеносных сосудов. В некоторых случаях визуализация таких объектов затрудняется в связи с крайне высоким показателем рассеяния крови μ_s = 600–1000 см$^{-1}$ [1].

Для решения данной проблемы предложено использование локальных вариаций интенсивности пикселей ОКТ изображений для определения средних изменений свойств рассеивателей в исследуемой части ткани.

Оптические характеристики ткани и сосудов сильно различаются, а, следовательно, им соответствует различная интенсивность пикселей конечного изображения [2]. Для проверки данной гипотезы были построены гистограммы распределения цветов изображения для участков кожи и сосудов, рис. 1. Усредненные для минимизации погрешности гистограммы были поставлены в соответствие гамма распределениям.

Полученные гистограммы демонстрируют различия среднего значения коэффициентов α/β соответствующих графиков гамма распределения, которое составило, $\alpha/\beta = 2.7\cdot10^{-4}$ для области крови и $\alpha/\beta = 7.0\cdot10^{-4}$ для кожи, $\alpha/\beta = 8.0\cdot10^{-4}$ для воздуха. Точность аппроксимации составило $R^2 \sim 0.95$, что демонстрирует количественное соответствие обработанных данных [3].

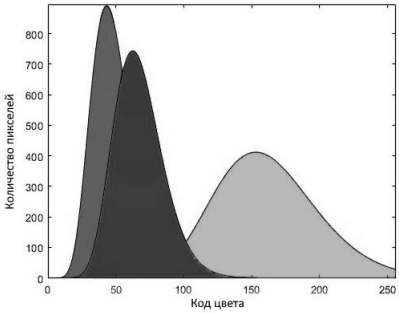


Рис. 1. Гамма-распределения соответствующие гистограммам интенсивности пикселей для области воздуха (слева), кожи (посередине) и крови (справа)

Исследована область перехода от неподвижной ткани к крови. Результат построения гистограммы интенсивности определялся количественно по уменьшению амплитуды соответствующей пику и форме распределения. Было выявлено, что каждой структуре биообъекта в ОКТ и, возможно, УЗИ изображений соответствует пик распределения на гистограмме интенсивности пикселей, имеющий форму близкую к правильной форме гамма-распределения.

Дальнейшее развитие представленного алгоритма позволит создать автоматизированное дифференцирование структур изображений различных тканей и крови млекопитающих *in vivo*.

Список литературы

1. Черешнев В.О., Романенко И.М., Кулешов И.В., Проскурин С.Г. Дифференциация структур кожи, кровеносных сосудов и крови посредством построения вариационной матрицы ОКТ изображения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 319-323.

2. Проскурин С.Г., Фролов С.В., Визуализация кровеносных сосудов при помощи оптической когерентной томографии // Медицинская техника. 2012. № 3. С. 9-14.

3. Проскурин С.Г., Потлов А.Ю., Галеб К.И.С., Абдулкарим С.Н. Построение структурного изображения биообъекта с использованием растрового усреднения в оптической когерентной томографии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 9. С. 129-134.

УДК 535(06)+004(06)

И.Н. КОЛОКОЛЬНИКОВ, Е.А. САВЧЕНКО, Е.Н. ВЕЛИЧКО
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ ПУЛЬСОВОЙ ДЕНСИТОМЕТРИИ

Определение скорости элиминации индоцианина зелёного в крови – один из наиболее информативных способов оценки функции печени. В качестве метода предлагается использовать оптическую пульсовую денситометрию. В работе представлена схема неинвазивного датчика для измерения поглощения света исследуемым объектом на определённой длине волны, система обработки сигнала, а также анализа информации о поглощении света биотканью со связанным в ней красителем.

I.N. KOLOKOLNIKOV, E.A. SAVCHENKO, E.N. VELICHKO
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

OPTICAL PULSE DENSITOMETRY METHOD IMPLEMENTATION

Determination of the plasma disappearance rate of indocyanin green – is one of the the most informative way to assess hepatic function. We propose to use optical pulse densitometry method. In this work we present scheme of non-invasive sensor for measurement of light absorption by studied object for determined wavelength, signal processing system, and analysis of information of light absorption by studied biological tissue and dye bounded in it.

В настоящее время одним из наиболее информативных способов оценки функции печени является исследование динамики элиминации индоцианина зелёного в плазме крови пациента (Plasma Disappearance Rate of Indocyanine Green – PDR_{ICG}) [1-3]. Существует два метода исследования элиминации красителя – последовательные пробы крови и денситометрия. Однако метод оптической денситометрии является более быстродействующим, и обладает достаточно высокой чувствительностью.

В связи с этим целью работы является создание денситометрического датчика и системы обработки сигнала, а также анализа получаемой информации о поглощении света участком ткани с введённым красителем.

Индоцианин зелёный – трикарбоцианиновый краситель с ярко выраженным пиком поглощения в ближней ИК области спектра (~ 790 нм). Широко применяется в медицинских исследованиях в связи с

тем, что биологические ткани и кровь имеют высокий коэффициент пропускания света на таких длинах волн. При взаимодействии с биотканью его спектр поглощения меняется. В результате связывания молекул индоцианина зеленого с органическими молекулами биологических тканей его пик поглощения смещается в сторону длинноволновой области. Максимум поглощения красителя приходится на 805 нм для крови и кожи человека in vivo, и на 810 нм для клеточных культур эпидермиса [4, 5].

Метод денситометрии предполагает измерение концентрации красителя с помощью измерения пропускания тканью с красителем света определённой длины волны. Для его реализации используется светодиод (с длиной волны излучения 805 нм), фотодиод для приёма излучения и система обработки сигнала. Схема разработанного датчика представлена на рис. 1.

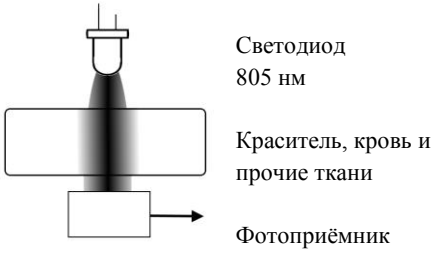


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Система обработки сигнала включает в себя микроконтроллер со встроенным АЦП и программу для компьютера, выполняющую анализ сигнала и отображение результатов. Датчик может быть закреплён на пальце пациента, на мочке уха, или на крыле носа – в области, где обеспечено хорошее пропускание толщей ткани света на используемой длине волны. Первые экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения данного датчика для измерения PDR_{ICG}.

Список литературы

1. Kholoussy A.M., Pollack D., Matsumoto T. // Critical Care Medicine. 1984. V. 12 (2).
2. Aono T., Sakaguchi T. et. al. // J. Int. Med. Res. 1995. V. 23 (4). P. 299-307.
3. Zoller B. et. al. // Annals of Intensive Care. 2014. V. 4 (19).
4. Ciamberlini C., Guarnieri V., Longobardi G. et. al. // J. Biomed. Opt. 1997. V. 2. P. 218-225.
5. Weersink R.A., Hayward J.E., Diamond K.R. et. al. // J. Photochem. Photobiol. 1997. V. 66. P. 326-335.

УДК 535(06)+004(06)

С.М. ЗАХАРОВ
Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука, Москва

ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

В работе представлен сравнительный анализ сигналов артериального давления (АД) и фотоплетизмографии (ФПГ), синхронизированных во времени, а также их спектральных особенностей. Показано, насколько адекватно можно судить об АД, имея только снятые данные ФПГ.

S.M. ZAKHAROV
Institute of Electronic Control Machines named after I.S. Brook, Moscow

MEASUREMENT OF ARTERIAL PRESSURE IN REAL TIME ON THE BASIS OF PHOTOPLETISMOGRAPHY

A comparative analysis of the signals of blood pressure (BP) and photoplethysmography (FPG), synchronized in time, as well as their spectral features, are presented in paper. It is shown how adequately one can judge about blood pressure, having only the removed FPG data.

Исходные данные в работе снимались тензометрическим датчиком, приложенным к запястью лучевой артерии, и пальцевым фотодатчиком плетизмографа. Низкочастотный тренд в сигналах АД и ФПГ устранялся программным образом методом сингулярного спектрального анализа. Отметим, что все расчеты выполнены в среде Maple 5v4.

Проблемы одновременного мониторинга сердечного ритма в случаях АД и ФПГ являются очень похожими. Тем не менее рассматриваемые сигналы отражают различные свойства функционирования сердечно-сосудистой системы, АД – механической активности а ФПГ – оптической, поэтому временные формы их фрагментов могут различаться.

На рис. 1 показана корреляционная функция синхронизированных сигналов АД и ФПГ, относящихся к минутному интервалу:

$$Corr(\tau) = \frac{< BP(t)PG(t+\tau) >}{< BP(t)PG(t) >}.$$

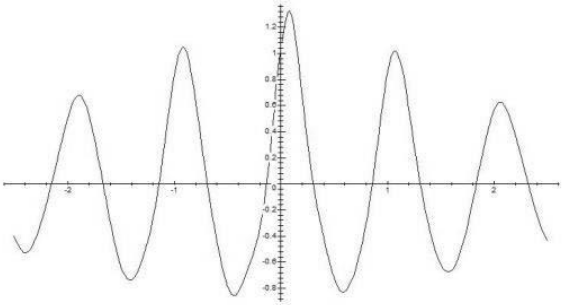


Рис. 1. Функция взаимной корреляции сигналов АД и ФПГ,
по оси абсцисс отложено время τ, с

На рис. 2 представлены во времени амплитудные отклонения сигналов систолического АД (САД), диастолического АД (ДАД) и фотоплетизмограммы.

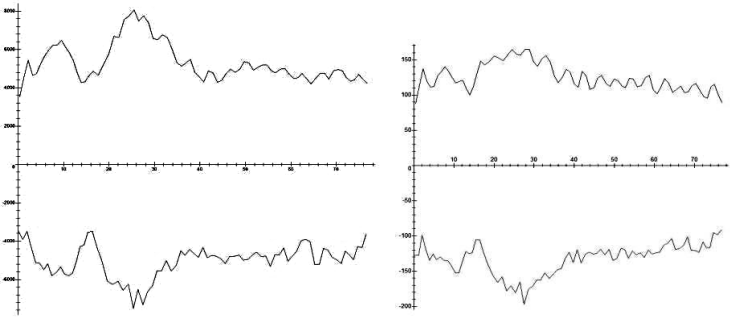


Рис. 2. Амплитудные отклонения систолического (вверху) и диастолического (внизу) АД и сигналов ФПГ в относительных единицах
(слева – АД, справа – ФПГ)

Имеется определенное временное и спектральное сходство сигналов АД и ФПГ, говорящее о возможности измерения АД методом ФПГ. Калибровку сигнала ФПГ можно осуществить, например, сравнением АД, измеренным аускультативным способом, и ФПГ [1].

Список литературы

1. Slapnicar G., Lustrek M.. Continuous blood pressure estimation from PPG signal // Informatica. 2018, V. 42. P. 33-42.

УДК 535(06)+004(06)

А.И. АНТОНОВ
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ УГЛЫ ПАДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследовались предельно допустимые углы падения излучения на двухслойные однорельефные рельефно-фазовые пилообразные микроструктуры на предмет влияния на них глубин и относительных периодов микроструктуры. Показано, что с увеличением глубины и относительного периода микроструктуры предельно допустимые углы увеличиваются в положительном и отрицательном направлениях, причем характер этого увеличения нелинеен.

A.I. ANTONOV
Penza State University of Architecture and Construction

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DEPTH AND RELATIVE PERIOD OF THE RELIEF-PHASE MICROSTRUCTURE ON THE MAXIMUM ALLOWABLE ANGLES OF INCIDENCE OF RADIATION

We studied the maximum permissible angles of incidence of radiation on two-layer single-relief relief-phase sawtooth-shaped microstructures for the effect of depths and relative periods of the microstructure on them. It is shown that with an increase in the depth and relative period of the microstructure, the maximum allowable angles increase in the positive and negative directions, and the nature of this increase is non-linear.

Выбор двухслойных рельефно-фазовых микроструктур в качестве ДОЭ в объективах позволяет добиться существенного ослабления зависимости его дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны λ и угла падения излучения θ [1]. Однако, при слишком больших углах падения θ фиксируется наличие негативного влияния побочных дифракционных порядков на качество формируемого изображения. В таком случае в качестве предельных (положительного и отрицательного) углов падения θ берутся такие углы $\theta^{+}_{пред}$ и $\theta^{-}_{пред}$, после увеличения которых (соответственно в положительную или отрицательную сторону) значение ДЭ опустится ниже 0,95 от ДЭ при нормальном падении

излучения ($\theta = 0$) и прочих одинаковых параметрах, поскольку при $\theta = 0$ ДЭ в первом порядке дифракции будет максимальной.

Согласно скалярной теории дифракции (СТД) ДЭ максимальна в первом дифракционном порядке при выполнении условия $h = \lambda/\Delta n$ [2], где $\Delta n = n_1 – n_2$, n_1 и n_2 – показатели преломления, соответственно, области из которой падает излучение и области, в которую входит излучение. В качестве объекта исследования была взята пилообразная рельефно-фазовая микроструктура с положительным тангенсом угла наклона рабочей поверхности и показателем преломления $n_2 = 1{,}5$. Длина волны падающего излучения $\lambda = 0{,}5$ мкм. Относительный период выражался как $P = \Lambda/h$, где Λ – период микроструктуры. Был использован строгий метод связанных волн [3], и алгоритм его реализации, описанный в работе [4].

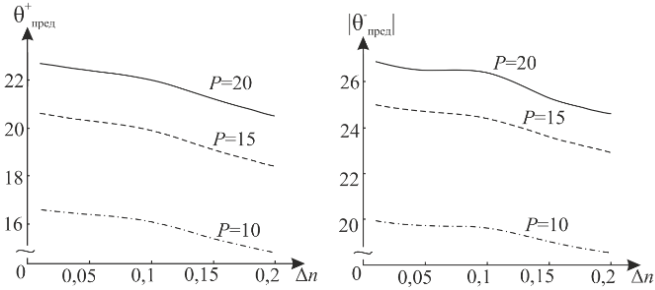


Рис. 1. Зависимости $\theta^+_{пред}$ и модулей $\theta^-_{пред}$ от Δn для различных P

Расчеты показали, что при фиксированном Δn с увеличением P предельно допустимые углы $\theta^+_{пред}$ и $\theta^-_{пред}$ возрастают по модулю (рис. 1), и такой рост замедляется с увеличением P. При фиксированном P с увеличением Δn углы $\theta_{пред}$ наоборот убывают по модулю. Отличие $\theta^+_{пред}$ и модулей $\theta^-_{пред}$ объясняется асимметричностью рельефа. Поскольку h и Δn обратно пропорциональны, предельно допустимые углы $\theta^+_{пред}$ и $\theta^-_{пред}$ возрастают как с увеличением относительного периода P, так и глубины микроструктуры h. Как видно из рис. 1 такие зависимости имеют нелинейный характер.

Список литературы

1. Грейсух Г.И. и др. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 6. С. 997-1004.

2. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986.

3. Moharam M.G. et. al. // J. Opt. Soc. Am. 1995. V. 12. No. 5. P. 1068-1076.

4. Антонов А.И., Васин Л.А., Грейсух Г.И. // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 2. С. 209-219.

УДК 535(06)+004(06)

Д.В. КУЗЬМИН, П.А. ХАНЕВИЧ, С.Б. ОДИНОКОВ,
В.В. МАРКИН, А.Ю. ЖЕРДЕВ, М.В. ШИШОВА, А.Ю. БЕТИН,
Н.В. НИКОНОРОВ[1], С.А. ИВАНОВ[1]
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[1]Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ БРЭГГОВСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ПРЕДЕЛЬНО МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

В данной статье представлены результаты моделирования для исследования зависимости угловой селективности от толщины объемной голографической решетки, выполненной на новом фоточувствительном материале ФТР-стекле. Реализация метода связанных волн была проведена в среде Matlab.

D.V. KUZMIN, P.A. KHANEVICH, S.B. ODINOKOV, V.V. MARKIN,
A.Yu. ZHERDEV, M.V. SHISHOVA, A.Yu. BETIN,
N.V. NIKONOROV[1], S.A. IVANOV[1]
Bauman Moscow State Technical University
[1]ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH AND EVALUATION OF THE OBTAINED PARAMETERS OF THE ANGULAR SELECTIVITY OF BRAGG DIFFRACTION GRATINGS OF EXTREMELY SMALL THICKNESS

This article presents the simulation results for studying the dependence of angular selectivity on the thickness of a volume holographic grating, made on a new photosensitive material in FTR glass. The implementation of the coupled wave method was carried out in a Matlab environment.

В объемных голограммах свет претерпевает дифракцию при выполнении условия Брэгга, что приводит к эффективному восстановлению записанного волнового фронта. Это справедливо как для пропускающих, так и отражательных голограмм. Объемная запись интерференционной картины может быть реализована в виде пространственной модуляции показателя поглощения, показателя преломления, коэффициента усиления среды или комбинацией нескольких параметров [1-3].

Исходные данные.

1. Длина волны излучения λ_G = 520 нм, $\Delta\lambda$ = 33 нм.

2. Угол падения излучения соответствует условию Брэгга для достижения максимума дифракционной эффективности (ДЭ).

3. Показатель преломления n_G = 1,5007; амплитуда синусоидальной модуляции показателя преломления $n_{1\,G} = 5{,}23\cdot10^{-4}$.

4. Структура полностью фазовая, показатель поглощения и его модуляция равны 0.

5. Период брэгговской решетки d = 0,400 мкм.

6. Поляризация ТМ.

7. Толщина T варьируется от 20 мкм до 2 мм.

8. Для исследуемых пропускающих решеток угол наклона страт (относительно поверхности подложки) составляет 90°, страты перпендикулярны подложке.

9. Для исследуемых отражательных решеток угол наклона страт составляет 0°, страты параллельны подложке.

Полученные зависимости ДЭ от отклонения от условия Брэгга, для пропускающей и отражательной решёток приведены на рис. 1 и 2.

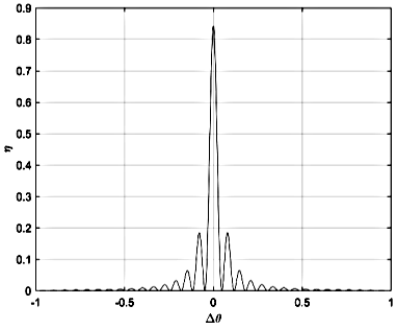


Рис. 1. Зависимость ДЭ от отклонения от условия Брэгга, для пропускающей решетки (T = 1500 мкм)

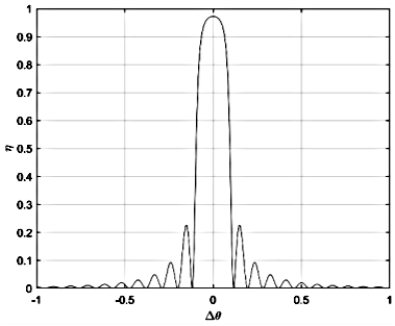


Рис. 2. Зависимость ДЭ от отклонения от условия Брэгга, для отражательной решетки (T = 500 мкм)

Список литературы

1. Kogelnik H. Теория взаимодействия для толстых голографических решеток. 1969. V. 48. № 9. P. 2909-2947.

2. Klein W.R., Cook B.D. Unified approach to ultrasonic light diffraction. 1967. SU-14. P. 123.

3. Moharam M.G., Gaylord T.K., Magnusson R. // J. Opt. Commun. 1980. V. 32, No. 14.

УДК 535(06)+004(06)

А.М. НАСТАС, М.С. ИОВУ,
А.Л. ТОЛСТИК[1], И.В. СТАШКЕВИЧ[1]
Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова
[1]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ - ХАЛЬКОГЕНИДНЫЙ СТЕКЛООБРАЗНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК

Исследованы процессы формирования голографических решеток на основе фотоструктурных превращений и фотодиффузии металла в тонкопленочных структурах металл - халькогенидный стеклообразный полупроводник (As_2S_3 и As_2Se_3). Показано, что дифракционная эффективность, голографическая чувствительность, динамический диапазон и контраст увеличиваются в несколько раз при использовании коронного разряда.

A.M. NASTAS, M.S. IOVU,
A.L. TOLSTIK[1], I.V. STASHKEVICH[1]
Institute of Applied Physics, Kishenev, Moldova
[1]Belarusian State University, Minsk, Belarus

CORONA DISCHARGE INFLUENCE ON THE FORMATION OF HOLOGRAPHIC GRATINGS IN STRUCTURES OF METAL - CHALCOGENIDE GLASSY SEMICONDUCTOR

The processes of formation of holographic gratings on the basis of the photostructural transformations and photo diffusion of metal in thin-film structures of metal - chalcogenide glassy semiconductor (As_2S_3 and As_2Se_3) are investigated. It is shown that diffraction efficiency, holographic sensitivity, dynamic range and contrast increase several times when corona discharge is used.

Среди неорганических фоторезистов наиболее востребованы способы оптической записи в тонких пленках халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) за счет фотоструктурных превращений и фотодиффузии металла в структуре металл-ХСП [1]. В работе [2] предложено проводить экспонирование с одновременной зарядкой структуры металл-ХСП в поле коронного разряда.

Целью данной работы являлось исследование возможности увеличения голографической чувствительности и дифракционной

эффективности при приложении поля коронного разряда к тонкопленочным структурам металл-ХСП в процессе записи голографических решеток.

Структуры для регистрации голографических решеток были получены методом последовательного термического напыления в вакууме на стеклянную подложку Ni и As_2S_3 ,а также Cu и As_2Se_3. Толщина металлических слоев составляла 40 - 50 нм, а толщина полупроводниковых слоев 1 мкм и 0,25 мкм, соответственно.

Исследование процесса записи голографических решеток на тонкослойных структурах металл-полупроводник проводилось с одновременной их зарядкой в поле коронного разряда, при этом в высокоомных полупроводниках создавалось электрическое поле напряженностью $E \sim (10^4 - 10^6)$ В/см.

Установлено, что при регистрации голографических дифракционных решеток в поле коронного разряда на тонкослойных структурах Ni-As_2S_3 происходит увеличение голографической чувствительности, дифракционной эффективности и контраста. Показано, что селективное травление этих решеток, полученных в поле коронного разряда в структуре Ni-As_2S_3, приводит к увеличению глубины рельефа на 30 - 40 % и увеличению дифракционной эффективности рельфно-фазовых решеток на 30 - 50 %. Выявлено, что использование отрицательного коронного разряда позволяет увеличить голографическую чувствительность и дифракционную эффективность решеток в тонкослойных структурах Cu - As_2Se_3 более чем в 3 раза. При этом лазерное облучение приводит к увеличению селективности растворения в растворе щелочи, что позволяет получать рельфно-фазовые решетки более высокого качества.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволяют утверждать, что разработанные способы записи оптической информации с использованием коронного разряда позволяют улучшить параметры зарегистрированных голографических изображений, дифракционных оптических элементов на базе ХСП, используемых в различных оптоэлектронных и голографических системах.

Список литературы

1. Венгер Е.Ф., Мельничук А.В., Стронский А.В. Фотостимулированые процессы в халькогенидных стеклообразных полупроводниках и их практическое применение. Киев: Академпериодика. 2007.

2. Nastas A.M., Andriesh A.M., Bivol V.V., Prisakar A.M., Tridukh G.M. Inventor's certificate 3330 (MD). MD – BOPI nr. 5/2007. P. 55.

УДК 535(06)+004(06)

Л.Н. БОРОДИНА, В.Н. БОРИСОВ, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СУХОМ ФОТОПОЛИМЕРЕ BAYFOL ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

Приведены результаты исследования фотополимерного светочувствительного материала для голографии Bayfol HX с помощью конфокального сканирующего микроскопа Zeiss LSM710. Микроскопические области исследуемого образца засвечивались лазерным лучом, измерялись локальные спектры люминесценции, а также коэффициент поглощения неэкспонированных и экспонированных участков. Обнаружены краевые эффекты. Варьирование размеров экспонируемых участков позволит выявить молекулярную подвижность.

L.N. BORODINA, V.N. BORISOV, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

LUMINESCENCE IN BAYFOL DRY PHOTOPOLYMER FILM AS STUDIED BY LASER SCANNING MICROSCOPY

The results of luminescence of Bayfol HX holographic photopolymer film study using a Zeiss LSM710 confocal scanning microscope are presented. Microscopic areas of a specimen were exposed to laser scanning beam and local luminescence spectra in intact and phototransformed states were measured, as well as light absorbance dynamics. Edge effects were observed. Varying the size of exposed areas will reveal molecular motion in the film.

Фотополимеры Bayfol HX [1] оптимальны для множества реализаций объёмной голографии, как изобразительных, так и технических. Воздействие видимого излучения вызывает не только полимеризацию, но и изменение спектров поглощения и фотолюминесценции (ФЛ), отслеживание которых позволяет изучать динамику процессов, сопутствующих голографической записи. Использование для этого лазерного микроскопа даёт возможность работы с участками малой площади, позволяет исследовать молекулярную подвижность и оценить эффективность процессов [2]. Люминесцентные микроизображения (рис. 1) показывают наличие краевых эффектов, которые могут свидетельствовать о перемещении люминесцирующих молекул. Спектр ФЛ материала состоит из двух полос (рис. 2); их наличие также и в

спектре возбуждения ФЛ указывает на возможность переноса энергии. Спектры ФЛ, измеренные с помощью спектрофотометра и микроскопа, различаются слабо (рис. 3). В ходе фототрансформации интенсивности полос ФЛ меняются с разной скоростью (рис. 4).

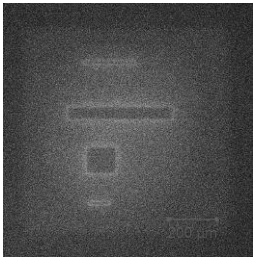


Рис. 1. Люминесцентное изображение участка плёнки Bayfol HX с прямоугольными участками, экспонированными излучением лазерного сканирующего микроскопа

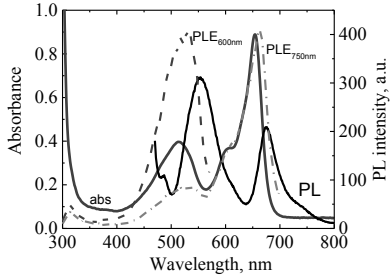


Рис. 2. Спектры поглощения (abs), люминесценции (PL, черная сплошная линия), возбуждения люминесценции (PLE, штриховые линии) при регистрации в «зелёной» и «красной» полосах люминесценции

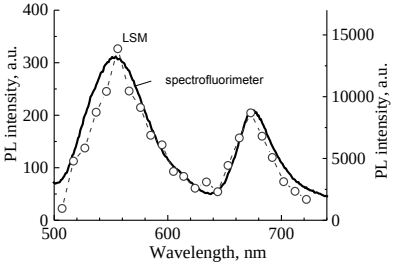


Рис. 3. Спектры люминесценции светочувствительного материала Bayfol HX, измеренные с помощью спектрофотометра Cary Eclipse (сплошная линия) и лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM710 (точки, штриховая линия)

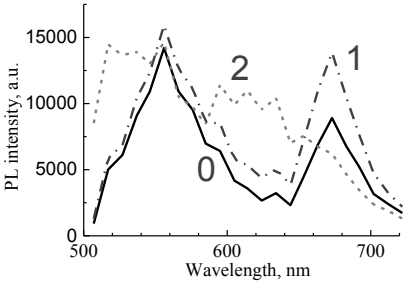


Рис. 4. Спектры люминесценции микроскопических участков плёнки Bayfol HX: не экспонированных (0) и экспонированных излучением 488 нм при малой (1) и большой (2) экспозициях

Список литературы

1. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. // Polymers. 2017. V. 9. P. 472.

2. Zakharov V.V., Baranov M.A., Zlatov A.S., Veniaminov A.V. // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. V. 5(6). P. 811-819.

УДК 535(06)+004(06)

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ[1], И.А. МАУРЕР, А.В. АРХИПОВ[1]
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕХАНИЗМЫ СОЗДАНИЯ РЕЛЬЕФНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА БИХРОМИРОВАННОМ ЖЕЛАТИНЕ

Использованы два альтернативных вида воздействия на желатин в слоях бихромированного желатина (БХЖ) – структурирование с помощью избирательного светового дубления излучением He-Cd лазера и деструкция, осуществляемая облучением слоев коротковолновым УФ излучением.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV[1], I.A. MAURER, A.V. ARKHIPOV[1]
Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
[1]Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

MECHANISMS OF THE HIGH-FREQUENCY HOLOGRAPHIC RELIEF STRUCTURE CREATION ON DICHROMATED GELATIN

Two alternative types of the influence on gelatin in layers of dichromed gelatin (DCG) are used in the work: the structuring by selective light tanning with the radiation of He-Cd laser and destruction resulted from the irradiation of layers with the short-wave UV radiation.

Подробно рассмотрены два альтернативных вида воздействия на желатин в слоях бихромированного желатина (БХЖ) – структурирование с помощью избирательного светового дубления излучением He-Cd лазера ($\lambda = 440$ нм) и деструкция, осуществляемая облучением слоев коротковолновым УФ излучением ($\lambda < 270$ нм). Применение стандартных методов обработки желатиновых слоев не позволяет получить достаточно высокий поверхностный рельеф на пространственных частотах более 200 - 300 мм$^{-1}$ вследствие сглаживающего воздействия сил поверхностного натяжения [1, 2]. Существенное расширение области регистрируемых пространственных частот (до 1500 мм$^{-1}$) для записи рельефных голографических решеток достигнуто нами с помощью применения усовершенствованной методики обработки желатина, основанной на сокращении времени водных процедур и использования изопропаноловых

ванн для быстрого обезвоживания слоя. Такой способ обработки будет препятствовать набуханию внутренних слоев БХЖ, а, следовательно, нивелировать действие сил поверхностного натяжения. Основной идеей предложенной сокращенной по времени водной обработки (10 с), которая прерывается в 100 % изопропаноловой ванне, является предположение, что фотодеградированные участки желатина успевают растворяться в воде быстрее, чем набухнут внутренние слои. Применение для быстрого обезвоживания изопропанола дает возможность отнести такой вид обработки к неравновесному типу [3].

Использование модифицированной методики позволило получить рельефные высокочастотные голографические решетки на пространственной частоте 1500 мм$^{-1}$ с дифракционной эффективностью (ДЭ) более 50 % при считывании голограмм излучением He-Ne лазера (λ = 630 нм) [4].

Для определения вклада в ДЭ решеток поверхностного рельефа проводился эксперимент с применением иммерсионного метода, снимались угловые зависимости ДЭ образцов, также было проведено прямое измерение поверхностной структуры решеток методом атомно-силовой микроскопии. Сопоставление экспериментальных результатов с выводами скалярных теорий дифракции света на пространственно-периодических структурах, а также и прямые измерения рельефа методом атомно-силовой микроскопии доказывают, что преимущественным механизмом дифракции света на высокочастотных решетках, полученных с помощью модифицированной обработки, является рельефно-фазовый механизм. Внутренняя решетка показателя преломления может вносить вклад только при толщинах слоя БХЖ, превышающих несколько микрон.

Результаты работы будут способствовать расширению области применения эффективных рельефных голографических решеток на слои БХЖ.

Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 19. С. 26-30.

2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 9. С. 1-5.

3. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Хазвалиева Д.Р. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 6. С. 30-32.

4. Гуляев С.Н. Фазовые голограммы на галоидосеребряных фотоматериалах. http://www.ioffe.ru/loeg/Workshop_Denisyuk/Proceedings/Sbornik/PP78-215.PDF.

УДК 535(06)+004(06)

В.Н. БОРИСОВ, Р.А. ОКУНЬ[1], В.В. ЛЕСНИЧИЙ[2], А.С. ПАВЛЮК
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
[2]Университет Фрайбурга, Фрайбург-в-Брайсгау, Германия

ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДКИ В ХОДЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ПРИМЕРЕ ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩЕЙСЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ BAYFOL HX

Целью данной работы является однозначное определение анизотропии усадки в ходе голографической записи. Проведено моделирование влияния усадки различной анизотропии на произвольно-ориентированные голограммы-решетки. Рассмотрены случаи изотропной усадки, анизотропии в направлении поверхностей материала, вектора решетки, а также смешанные случаи анизотропии. Разработан эксперимент по записи ПВО-голограмм в фотополимеризующемся композите Bayfol HX, на основе которого возможно однозначно определить тип анизотропии усадки. Особенности записи и анализа голограмм, результаты эксперимента и выводы обсуждаются в работе. Полученные результаты позволяют четко определить направление анизотропии усадки и корректно учитывать её при моделировании процессов фотополимеризации и многокомпонентной диффузии.

V.N. BORISOV, R.A. OKUN[1], V.V. LESNICHII[2], A.S. PAVLYUK
ITMO University, Saint-Petersburg
[1]Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
[2]Albert-Ludwig University of Freiburg, Freiburg in Breisgau, Germany

INVESTIGATION OF SHRINKAGE IN THE COURSE OF HOLOGRAPHIC RECORDING IN BAYFOL HX PHOTOPOLYMER-BASED HOLOGRAPHIC MEDIUM

The aim of this work is the determination of shrinkage anisotropy during holographic recording. The modelling of the system of arbitrary oriented holographic gratings subjected to a set of shrinkage vectors was conducted. The cases of isotropic shrinkage, anisotropy in the directions of the edges of material or grating vector, and mixed cases were studied. Experimental procedure of the TIR-holograms recording in the photopolymeric material Bayfol HX was developed for the strict determination of the type of shrinkage anisotropy. The results of such experiments, as well as features of the recording and analysis of holograms involved, are discussed in the work. Obtained results allow for strict determination of the shrinkage anisotropy direction.

Эффекты усадки имеют большое значение в прикладной голографии, так как усадка может значительно влиять на характеристики регистрируемых голограмм и голографических оптических элементов. В основном усадка проявляется в фотополимерах и является следствием увеличения плотности материала при полимеризации.

В исследовании рассмотрены три случая усадки: полная изотропия, анизотропия в направлении поверхностей материала, а также анизотропия в направлении вектора решетки. Составлена модель, описывающая влияние усадки на основные геометрические параметры голограмм: пространственный период, поверхностный период, угол наклона голографических плоскостей, эффективная толщина.

В соответствии с моделью разработан эксперимент, позволяющий однозначно определить тип анизотропии усадки. Эксперимент заключается в записи и дальнейшем измерении параметров ПВО-голограммы в геометрии, изображенной на рис. 1.

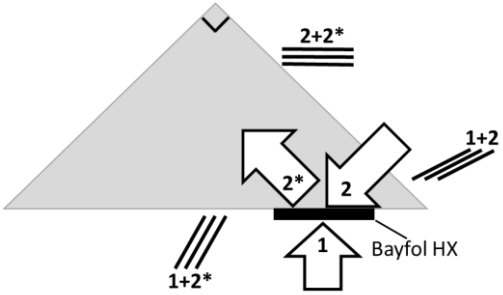


Рис. 1. Схематичное представление условий регистрации ПВО-голограммы в материале Bayfol HX, накатанном на прямоугольную призму; луч 2* является зеркальным отражением луча 2 под углом ПВО

При записи образуется три разных голограммы-решетки. Лучи 1 и 2 формируют пропускающую голограмму, в то время как лучи 1 и 2* формируют отражательную голограмму. Голограммы имеют одинаковый поверхностный период, однако разные пространственные периоды и углы наклона. Усадка различных типов анизотропии приводит к такому изменению параметров голограмм, что измерение углов дифракции и контуров селективности данных голограмм позволяет однозначно определить тип анизотропии усадки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01048.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ, Э.А. ХРАМЦОВ
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРЯМОЙ ЗАПИСИ ФАЗОВЫХ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММ В «КРАСНОЙ» ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Предложен полимерный материал для записи объемных фазовых голограмм посредством фотосенсибилизированного окисления фрагментов полимерных цепей антраценовой структуры атмосферным кислородом. Экспериментально продемонстрирована запись голографических решеток с разрешением 1000 мм$^{-1}$ в слоях толщиной более 10 мкм.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH, E.A. KHRAMTSOV
Belarusian State University, Minsk, Belarus

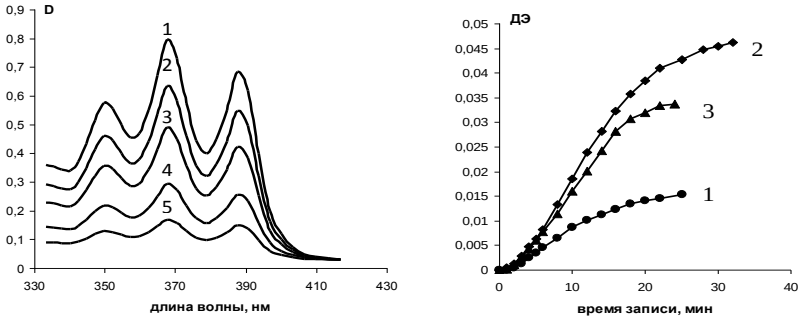
POLYMERIC MATERIAL FOR DIRECT RECORDING OF PHASE VOLUME HOLOGRAMS IN “RED” SPECTRAL RANGE

A polymer material is proposed for recording volumetric phase holograms by photosensitized oxidation of fragments of polymer chains of anthracene structure with atmospheric oxygen. The recording of holographic gratings with a resolution of 1000 mm^{-1} in layers with a thickness of more than 10 μm was experimentally demonstrated.

В разработанном в ГОИ объемном голографическом материале Реоксан [1] для фотомодификации показателя преломления используется фотосенсибилизированное окисление молекулярного антрацена синглетным кислородом. Выбор фотосенсибилизатора создает возможность смещать область спектральной чувствительности материала в пределах всей видимой части спектра. Обычно большая толщина (> 100 мкм) регистрирующих слоев обеспечивает как высокую дифракционную эффективность (ДЭ), так и высокую угловую и спектральную селективность. Негативный аспект, связанный со значительной толщиной, это необходимость длительного насыщения фотослоев кислородом при высоком давлении, и ограниченное время сохранения фоточувствительности из-за постепенного удаления кислорода из слоев при атмосферном давлении. Существуют применения объемных голограмм, не требующие от них высокой ДЭ и селективности,

например, в целях индикации. Для них могут быть использованы слои толщиной в несколько микрон, проницаемые для атмосферного кислорода. В настоящей работе мы попытались применить механизм функционирования материала Реоксан для записи объемных голограмм в слоях небольшой толщины, чтобы использовать для окисления антраценовых фрагментов атмосферный кислород.

В качестве полимерной основы был использован полимер с температурой стеклования 40 °С, содержащий боковые фрагменты со структурой монозамещенного антрацена. К раствору полимера в хлороформе добавляли фотосенсибилизатор синглетного кислорода с поглощением в области 620 - 640 нм, слои толщиной 1 - 15 мкм наносили на стеклянные подложки центрифугированием или поливом. Облучение слоев толщиной 1 - 2 мкм светодиодом с $\lambda_{max} = 650$ нм показало, что фотоокисление антраценовых фрагментов приводит к эффективному их превращению в фотопродукт с более коротковолновым спектром поглощения (рис. 1*а*), предположительно пероксид, что, как и для Реоксана, должно уменьшать показатель преломления материала. Кинетики записи голографических решеток с периодом 1 мкм по симметричной схеме излучением He-Ne лазера $\lambda = 633$ нм приведены на рис. 1*б*. Максимальная ДЭ достигалась при толщине слоя 8 - 9 мкм, оценка средней амплитуды модуляции показателя преломления при этом дает значение 0,005.



а *б*

Рис.1. Спектры поглощения материала при светодиодном облучении в течение 0 (1), 10 (2), 20 (3), 40 (4) и 70 (5) мин. (*а*); кинетики ДЭ голограмм в слоях полимера толщиной 6 (1), 8,5 (2) и 13,5 (3) мкм (*б*)

Список литературы

1. Лашков Г.Н. // В кн.: Несеребряные фотографические процессы. Л., 1984. С. 130-146.

УДК 535(06)+004(06)

Е.Ф. ПЕН[1,2]
[1]*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*
[2]*Новосибирский государственный технический университет*

ДИНАМИКА ОДНОВРЕМЕННОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ НАЛОЖЕННЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЁТОК В ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ

Проведены экспериментальные исследования динамики одновременной записи голографических наложенных отражательных решёток в фотополимерном материале. Получены новые данные, подтвердившие справедливость нелокальной диффузионной модели фотополимеризации.

E.F. PEN[1,2]
[1]*Institute of Automation and Electrometry of SB RAS, Novosibirsk*
[2]*Novosibirsk State Technical University*

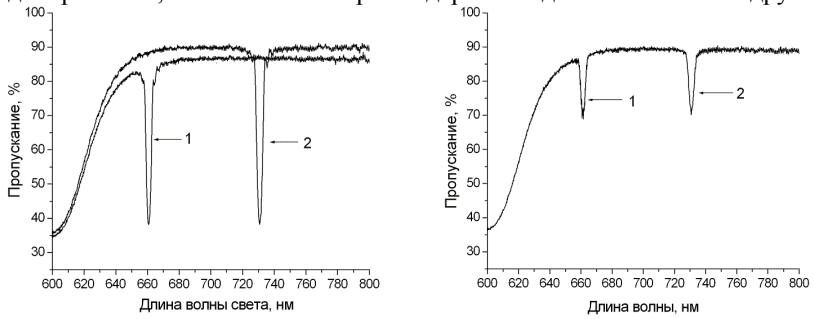
DYNAMICS OF SIMULTANEOUS RECORDING OF HOLOGRAPHIC SUPERIMPOSED REFLECTIVE GRATINGS IN PHOTOPOLYMER MATERIAL

Experimental studies of the dynamics of the simultaneous recording of holographic superimposed reflective gratings in photopolymer material have been carried out. New data have been obtained that confirm the validity of the nonlocal diffusion photopolymerization model.

Голографические фотополимерные материалы (ФПМ), нашедшие практическое применение в оптической памяти, защитной и изобразительной голографии, технике дисплеев, остаются объектом глубоких исследований физико-химических процессов фотополимеризации [1]. Известный нелокальный диффузионный механизм [1] хорошо согласуется с экспериментальными фактами при формировании в ФПМ простейших пропускающих и отражательных голографических решёток. Однако более сложные ситуации, например динамика записи наложенных голограмм, малоизучены. Неясно, одновременно ли формируются решетки с различающимися периодами, имеет ли место конкуренция в диффузии мономера для решёток с близкими периодами, влияет ли различие в интенсивностях записывающих пучков на дифракционную эффективность каждой из них?

Цель работы – получить новые экспериментальные данные о динамике одновременной записи наложенных отражательных голограмм в ФПМ, которые помогут углубить знания процессов записи в этих материалах, а также позволят полнее реализовать их возможности.

Эксперименты проводились с использованием ФПМ фирмы BayerMaterialscience [1] на автоматизированной установке, оснащенной двумя лазерами, фотозатворами и цифровым спектрофотометром. На рис. 1 представлены спектры пропускания одиночных (рис. 1*а*) и наложенных (рис. 1*б*) объемных отражательных решёток с разными пространственными периодами, которые записывались раздельно, одновременно, а также с некоторой задержкой одна относительно другой.



а *б*

Рис. 1. Спектры пропускания одиночных (*а*) и наложенных (*б*) отражательных решёток

Спектральные провалы характеризуют длину волны и дифракционную эффективность (ДЭ) решёток. Кривые 1 и 2 относятся к решёткам с периодами 220 и 245 нм соответственно. Видно, что ДЭ решёток не зависят от их периодов, одиночные решётки обладают большей эффективностью, чем каждая из наложенных.

В случае одновременной записи двух наложенных решёток с близкими периодами не наблюдается их конкуренции, что подтверждает диффузионную модель нелокальной фотополимеризации; в то же время для решётки, записанной с задержкой засветки, конечное количество фотополимера меньше, что приводит к уменьшению ДЭ этой решётки.

Регистрация динамики записи демонстрирует эффект темнового усиления ДЭ (продолжение реакции фотополимеризации при прерывании засветки), что также свидетельствует в пользу нелокальной модели [1].

Список литературы

1. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. // Polymers. 2017. V. 9 (10). P. 472-494.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Рассмотрена схема записи голограмм исследуемой периодической структуры одним пучком света. Преимуществом данной схемы записи голограмм является возможность использования некогерентного источника света. Показана возможность формирования голограмм периодических структур для реализации способа голографической интерферометрии с повышением чувствительности измерений.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

RECORDING HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES IN INCOHERENT LIGHT

The scheme of recording holograms of the investigated periodic structure by one beam of light is considered. The advantage of this hologram recording scheme is the possibility of using incoherent light source. The possibility of forming holograms of periodic structures for the implementation of the method of holographic interferometry with increased sensitivity of measurements is shown.

В системах оптической обработки сопряженных голограмм фазовых объектов, используемых для восстановления интерференционных картин, а также для перезаписи голограмм фазовых объектов возможно применение низкокогерентных источников света [1].

На рис. 1 представлена оптическая схема записи голограмм периодических структур при использовании одного светового пучка, освещающего исследуемую периодическую структуру *O*. Данная схема записи голограмм использовалась ранее при перезаписи голограмм фазовых объектов [1], а также записи опорной голограммы при реализации голографической интерферометрии реального времени для исследования динамических периодических структур [2]. В такой схеме записи голограмм возможно использование источников света с низкой пространственно-временной когерентностью. Для записи голограммы, содержащей информацию об отклонении периода периодической структуры от среднего значения или отклонения формы поверхности

структуры от плоскости, посредством отверстий в экране *SF*, установленном в задней плоскости объектива L_1, выделяется пара световых волн, которая коллимируется объективом L_2, и в плоскости регистратора *H* формирует голографическую структуру.

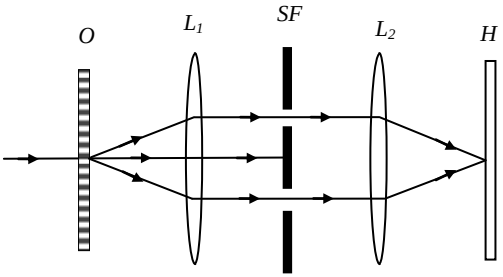


Рис. 1. Оптическая схема записи голограммы одним пучком света

Ранее авторами [2, 3] для целей голографической интерферометрии периодических структур предложена возможность регулирования коэффициента чувствительности измерений от 1 до 2n, где n – номер дифракционного порядка. Показано, что выбор пары световых волн, дифрагированных на периодической структуре и формирующих голограмму, будет определять чувствительность измерений при дальнейшем использовании данной голограммы в интерферометрии. В этом случае пространственная частота полос голографической структуры на голограмме возрастает в 2n раз, а также в 2n раз усиливается фаза. Следует заметить, что величина фазовых искажений также зависит от выбираемых порядков дифракции, это связано с тем, что световые пучки более высоких порядков дифракции проходят оптическую систему L_1 и L_2, значительно смещаясь от главной оптической оси системы, чем пучки более низких порядков. Фазовые искажения определяют систематическую погрешность измерений, но при использовании данных голограмм периодических структур в процедуре измерений или контроля могут быть учтены и компенсированы.

Список литературы

1. Бекетова А.К. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.

2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 3. С. 56-60.

3. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // Проблемы физики, математики и техники. 2019. № 1. С. 7-12.

УДК 535(06)+004(06)

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ, К.М. ЖУМАЛИЕВ
Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАММЫ ПРИ НАГРЕВЕ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ ЧЕРЕЗ ПОГЛОЩАЮЩУЮ ПОДЛОЖКУ

Решена двухмерная задача о нагреве тонкой пленки лазерным излучением через поглощающую подложку с целью проявления записанной на пленке голограммы. Рассмотрены различные предельные случаи и найдены выражения для температурных зависимостей, позволяющих оценить время нагрева для достижения температуры размягчения носителя.

N.K. DZHAMANKYZOV, Y.K. ISMANOV, K.M. ZHUMALIEV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz republic, Bishkek

HOLOGRAM RECONSTRUCTION DURING HEATING OF A PHOTOTHERMOPLASTIC FILM BY A LASER BEAM THROUGH AN ABSORBING SUBSTRATE

The two-dimensional problem of heating a thin film by laser radiation through an absorbing substrate with the aim of developing a hologram recorded on the film is solved. Various limiting cases are considered and expressions are found for the temperature dependences that make it possible to estimate the heating time in order to reach the softening temperature of the carrier.

Температура размягчения T_1 фототермопластической пленки находится из решения двухмерной системы уравнений теплопроводности следующего вида

$$\frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} - a_{1,2}\left[\frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_{1,2}}{\partial r}\right)\right] = \frac{q_{1,2}(r,z)}{\rho_{1,2}c_{1,2}}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность, a_1 – коэффициент теплопроводности материала пленки, t – длительность импульса излучения, c – теплоемкость, индексы $1, 2$ относятся к параметрам пленки и подложки, соответственно; $T = T(z, r, t)$.

Для тонких пленок (например, для ФТП пленок на стеклянной подложке) решение уравнения теплопроводности приводит к следующей зависимости

$$T_1(r,t) = \frac{2I_0 D_1 A_2}{\sqrt{\pi} k_2} \sqrt{a_2 t} \left[1 + \frac{\sqrt{\pi} F(\alpha_2 \sqrt{a_2 t})}{2\alpha_2 \sqrt{a_2 t}} \right] w(r), \qquad (2)$$

где D_1 – коэффициент пропускания пленки, A_2 – поглощательная способность, α_2 – коэффициент поглощения подложки; функция, $w(r)$ описывает радиальное распределение интенсивности, явный вид рассматривается ниже; ослабление светового потока по оси z описывается законом Бугера-Ламберта; I_0 – интенсивность излучения в точке $z = r = 0$. В большинстве случаев радиальное распределение интенсивности источников лазера описывается функцией Гаусса

$$w(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}}, \qquad (3)$$

где r_0 – полуширина пучка на плоскости голограммы. Как видно из (3) при $r = r_0$ интенсивность пучка в e^2 раз меньше чем, в центре. Это означает, что температура в центре голограммы в e^2 раз больше, чем температура на краю голограммы. Это обстоятельство крайне отрицательно влияет на качество проявления записи оптической информации, так как дифракционная эффективность на поверхности голограммы будет разной. Поэтому одной из главных задач использования лазеров для нагрева с целью проявления голограммы является получение равномерного освещения поверхности голограммы [1-5].

Список литературы

1. Dzhamankyzov N.K., Ismanov Y.Kh. Temperature modes of development of holograms recorded on photothermoplastic media heated by laser // Optical Engineering. 2018. No.6. P. 067103.

2. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х. Температурный режим проявления скрытого изображения голографической записи на фототермопластических носителях // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 275-276.

3. Исманов Ю.Х., Кулмурзаев Н.М., Тургунбаев Н.А. Регистрирующие среды для голографии и радужная голография // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2014. № 1. С. 83-88.

4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 104-106.

5. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. № 4(40). С. 194-198.

УДК 535(06)+004(06)

С.С. АНУФРИК, А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МНОГОЭКСПОЗИЦИОННЫХ ГОЛОГРАММ С ПОВЫШЕНИЕМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработан способ оптической обработки нескольких многоэкспозиционных голограмм, позволяющий минимизировать влияние систематической погрешности измерений, возникающей из-за неоднородностей подложек голограмм и аберраций схемы записи и восстановления, при формировании интерферограмм с повышением чувствительности измерений.

S.S. ANUFRIK, A.I. BUTS, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

OPTICAL PROCESSING OF MULTI-EXPOSURE HOLOGRAMS WITH INCREASED SENSITIVITY OF MEASUREMENTS

A method has been developed for the optical processing of several multi-exposure holograms, which lets to minimize the influence of the systematic measurement error arising due to the inhomogeneities of the hologram substrates and aberrations of the recording and restoration schemes during the formation of interferograms with an increase of the measurement sensitivity.

При записи и оптической обработке серии голограмм с использованием нескольких носителей возникают погрешности измерений, обусловленные влиянием неоднородностей подложек носителей голограмм [1, 2].

В данной работе предложен способ оптической обработки нескольких многоэкспозиционных голограмм, позволяющий минимизировать влияние систематической погрешности измерений, возникающей из-за неоднородностей подложек голограмм, при формировании интерферограмм с повышением чувствительности измерений. Следует отметить, что данный способ позволяет на конечном этапе оптической обработки использовать некогерентное освещение.

Предлагаемый способ оптической обработки реализуется в два этапа. На первом этапе оптической обработки производится перезапись голографических структур при восстановлении многоэкспозиционной

голограммы, соответствующих интересующим нас экспозициям, в комплексно сопряженных ± 1-х порядках дифракции на два новых носителя. При перезаписи реализуется контроль равенства векторов перезаписанных голографических структур. Для достижения повышения чувствительности измерений при перезаписи пары голограмм обеспечиваются нелинейные условия регистрации [3-5]. Перезапись многоэкспозиционных голограмм осуществляется двумя когерентными пучками в устройстве перезаписи, технически реализованном на базе любого двухлучевого интерферометра, например Маха-Цендера [4], дополненного оптической системой фильтрации волн, восстановленных в комплексно сопряженных ± 1-х порядках дифракции.

На втором этапе полученная пара голограмм может быть обработана в оптическом анализаторе сопряженных голограмм [5], но с использованием уже некогерентного света. Можно показать, что при выделении $\pm n$-х порядков дифракции в плоскости регистрации интерферограммы будет формироваться интерференционная картина с настройкой на бесконечно широкую полосу, отображающая изменение объекта, прошедшие за время между экспозициями, соответствующими записи исходных многоэкспозиционных голограмм:

$$I_{cb} = 1 + \cos\left[4n\left(\varepsilon_b - \varepsilon_c\right)\right], \qquad (1)$$

где $\varepsilon_b - \varepsilon_c$ - изменение фазы между экспозициями.

Чувствительность измерений такой интерферограммы повышена в $4n$ раз, а аберрации системы регистрации и оптической обработки, а также неоднородности подложек носителей компенсированы полностью. Следует отметить, что настройка интерференционной картины с полной компенсацией аберраций возможна только при равенстве векторов голографических структур, т.е. при настройке на полосу бесконечной ширины.

Список литературы

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
2. Лявшук И.А., Ляликов А.М. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. No. 2. С. 154-158.
3. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
4. Голографическая интерферометрия фазовых объектов /под ред. Г.И. Мишина. Л.: Наука, 1979.
5. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов: монография. Гродно: ГрГУ, 2010.

УДК 535(06)+004(06)

А.П. ГУБАРЕВ[2], А.Н. ШАЛЫГИН[1], А.Д. ЩЕРБИНА[2],
А.С. КУЗНЕЦОВ, С.Б. ОДИНОКОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]ООО «ВИЧЕЛ», Москва

ЗАЩИТНЫЕ ГОЛОГРАММЫ С ЛАТЕНТНЫМИ, СЛУЧАЙНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ МАГНИТНЫМИ МИКРОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Рассмотрен способ защиты голограмм, основанный на введении внутрь них магнитных частиц, имеющих микронные размеры, и расположенных случайным образом друг относительно друга. Проверка подлинности голограмм проводится путем визуализации наличия и расположения частиц с помощью магнитооптических методик с помощью специализированных малогабаритных визуализаторов. Подлинность голограммы оценивается путем анализа получаемых магнитооптических изображений зрительно, либо с помощью программных приложений, загружаемых в визуализаторы.

A.P. GUBAREV[2], A.N. SHALYGIN[1], A.D. SHCHERBINA[2],
A.S. KUZNETSOV, S.B. ODINOKOV
Bauman Moscow State Technical University
[1]Lomonosov Moscow State University
[2]VICHEL LLC, Moscow

PROTECTIVE HOLOGRAMS WITH LATENT, RANDOMLY DISTRIBUTED MAGNETIC MICRO-SIZED PARTICLES

A method of protecting holograms based on the introduction of magnetic particles having micron sizes, located randomly relative to each other, is discussed. Hologram authentication is performed by visualizing the presence and location of particles using magneto-optical techniques using specialized small-sized Visualizers. The authenticity of the hologram is estimated by analyzing the obtained magneto-optical images visually or using software applications loaded into the Visualizers.

Голографические этикетки, наклейки, фольги и ленты широко используются для защиты от подделки как серийной, выпускаемой массовыми тиражами продукции (банкнот, акцизных марок, упаковки), так и уникальных изделий, единственных в своем роде (документов, ценных бумаг, музейных ценностей и др.) [1, 2]. Предполагается, что

прикрепляемые к защищаемым изделиям голограммы подделать трудно. Однако из-за характерного радужного блеска защитных голограмм при быстром и не тщательном их рассматривании, поддельные голограммы часто трудно отличить от подлинных. Поэтому для визуального или приборного распознавания подлинности голограмм в них вводят различные защитные элементы и элементы, приводящие к разрушению формируемых изображений при попытках отсоединения голограмм.

Представлена оригинальная технология маркировки голограмм, формирования в них скрытого защитного признака, который также может выполнять функцию регистрации несанкционированного доступа.

Маркировка осуществляется путем введения в какой-либо из внутренних слоев голограммы, или в ее клеевой слой, случайно расположенных магнитных частиц. Проверка подлинности голограммы, и соответственно изделия, на котором она размещена, производится по изображению в визуализирующем магнитооптическом кристалле, возникающему под действием магнитных полей рассеяния частиц. Оценка подлинности производится визуально, либо автоматизировано с помощью специальных программных приложений, и осуществляется, путем сравнения визуализируемых изображений, получаемых при проведении проверок с изображениями, регистрируемыми при персонализации голограмм. На рис. 1 показана фотография устройства, визуализирующего латентные распределения магнитных частиц. На рис. 2 и 3 представлены характерные изображения, получаемые при персонализации голограмм и проверках их на подлинность.

Рис. 1. Фотография устройства

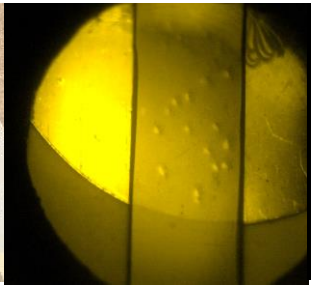


Рис. 2. Изображение магнитных частиц

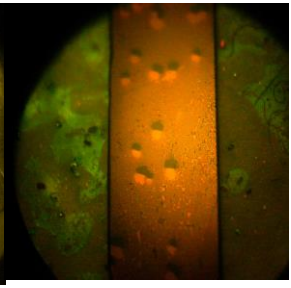


Рис. 3. Изображение магнитных частиц

Список литературы

1. Kovalev M. Mass production of computer-generated Fourier holograms and its application to prevent counterfeiting // Proc. SPIE. 2018. V. 10818. P. 1081819.

УДК 535(06)+004(06)

Н.В. ШОСТКА, Б.В. СОКОЛЕНКО, В.И. ШОСТКА
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ЗАХВАЧЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ПИНЦЕТА

В представленной работе рассмотрен метод реализации реконфигурируемой трёхмерной оптической ловушки, несущей оптический вихрь, для пространственного удержания микрочастиц в цифровой голографической микроскопии.

N.V. SHOSTKA, B.V. SOKOLENKO, V.I. SHOSTKA
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY OF TRAPPED MICROPARTICLES BY OPTICAL TWEEZER

We report on development of optical tweezers based on uniaxial crystal anisotropy for generation of adjustable “bottle” beam trap carrying optical vortex for spatially confinement of microparticles in the in-line digital holographic microscopy setup.

Одним из активно развивающихся направлений неинвазивного исследования свойств микрообъектов является метод, основанный на принципе управления пространственным положением объектов и их кластеров посредством взаимодействия лазерного излучения с веществом в оптических ловушках. Оптические ловушки необходимы для создания манипуляторов с минимизацией физического воздействия с целью перемещения объектов вдоль заданных траекторий, их пространственной переориентации и исследования физических свойств.

Оптические пинцеты произвели революцию в биологических и биофизических исследованиях и дали возможность провести сотни исследований механизмов работы одной молекулы, ее микромеханических свойств, а также сил и особенностей ее взаимодействия с другими молекулами [1-4]. Оптические устройства захвата и манипулирования перспективны в сочетании с цифровой голографической микроскопией биологических объектов и изолированных частиц с большой гибкостью [5].

Оптические устройства захвата и манипулирования перспективны в сочетании с оптической цифровой голографической микроскопией

микрочастиц, где реализация трёхмерного захвата и удержания объекта с полноценной бесконтактной объемной визуализацией дает существенно расширенные возможности. К примеру, цифровая голографическая микроскопия позволяет сканировать глубину пространства кюветы, заполненную набором частиц различной формы и размера, с субмикронным разрешением посредством всего лишь одного снимка. Метод дает возможность точно определять локализацию тестируемого образца, производить контроль его смещения с большой глубиной резкости изображаемого пространства, что имеет ключевое значение в прикладных задачах мониторинга динамических систем.

В нашей работе мы уделили особое внимание исследованию свойств оптических ловушек на основе сингулярных пучков. Данные пучки обладают крайне важными при работе с биологическими объектами характеристиками, такими как сохранение минимума интенсивности на оси пучка, что позволяет избежать нежелательного перегрева захваченного объекта, а также осесимметричная картина распределения поля в поперечных координатах [6]. Потеря симметрии поля пучка в области захвата напрямую влияет на эффективность оптической ловушки, которая может использоваться для селективного захвата микрочастиц различной массы и формы. Поэтому, управляя свойствами оптического пучка, мы можем контролировать эффективность захвата различных образцов без существенного изменения экспериментальной установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 19-42-910010р_а и частично поддержано Программой развития Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского на 2015 – 2024 годы.

Список литературы

1. Abbondanzieri E.A., Greenleaf W.J. et. al. // Nature. 2005. V. 438 (7067). P. 460-465.
2. Suzuki T., Yanai M. et. al. // Cell Research. 2006. V. 16. P. 887-894.
3. Zhong M.-C., Wei X.-B. et. al. // Nature Communications. 2013. V. 4. P. 1768.
4. Il'ina I.V., Sitnikov D.S. et. al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8427. P. 84270S.
5. Sinjab F., Awuah D. et. al. // Opt Express. 2018. V. 26 (19). P. 25211-25225.
6. Ivanov M.O., Shostka N.V. // J. Opt. 2016. V. 18. P. 075603.

УДК 535(06)+004(06)

А.А. ЖИХОРЕВА[1], А.В. БЕЛАШОВ[1,2], Т.Н. БЕЛЯЕВА[3], А.В. САЛОВА[3], Е.С. КОРНИЛОВА[3], И.В. СЕМЕНОВА[1], О.С. ВАСЮТИНСКИЙ[1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[3]*Научно-исследовательский институт цитологии РАН, Санкт-Петербург*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЖИВЫХ И МЕРТВЫХ КЛЕТОК НА ОСНОВЕ ИХ ФАЗОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

В работе представлены результаты создания алгоритма классификации живых и мертвых клеток линии HeLa с использованием данных об их оптических, морфологических и физиологических характеристиках. Нами было показано, что анализ десяти основных клеточных параметров, определенных из фазовых изображений, позволяет с точностью порядка 90 % определять состояние каждой клетки. Полученные результаты могут быть использованы для исследования резистивности живых клеток к различным типам и дозам внешнего воздействия.

A.A. ZHIKHOREVA[1], A.V. BELASHOV[1,2], T.N. BELYAEVA[3], E.S. KORNILOVA[3], A.V. SALOVA[3], I.V. SEMENOVA[1], O.S. VASYUTINSKII[1]

[1]*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*
[2]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[3]*Insittute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg*

APPLICATION OF DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR AUTOMATIC IDENTIFICATION OF LIVE AND NECROTIC CELLS ON PHASE IMAGES

In this work we present development of automatic live and necrotic cells classification algorithms on the basis of individual cells death phase images. We have shown that analysis of 9 basic parameters of living cells can be used for indentification of its condition with accuracy of about 90 %. The obtained results can be used for estimation of live cells resistivity to various types and doses of external stimuli.

Во многих биологических исследованиях отклик клеток на внешнее воздействие обычно исследуется с помощью флуоресцентной микроскопии, позволяющей, детектировать смерть клеток. Однако флуоресцентные маркеры обладают цитотоксичностью и влияют на реакцию клеток, что делает невозможным их длительное наблюдение и изучение динамики внутриклеточных процессов одной группы клеток. Методы цифровой голографической микроскопии могут применяться для получения динамики различных морфологических и оптических параметров, а также детектировать различные типы клеточной гибели без использования флуоресцентных красителей [1].

Голографические методы позволяют использовать малую плотность регистрирующего лазера, что позволяет неивазивно исследовать биологические объекты, в частность живые клетки in vitro [2]. По восстановленным фазовым распределениям можно найти ряд морфологический параметров и их динамику в ходе внешнего воздействия. Применение голографических методов позволяет оценить средний фазовый набег, толщину, объем, площадь мембраны, площадь проекции, сухую массу клетки и распределение интегрального показателя преломления, что помогает более полно исследовать внутриклеточные процессы.

В работе представлен алгоритм автоматической классификации живых и мертвых клеток линии HeLa на восстановленных фазовых распределениях. Процесс некроза клеток запускался с помощью фотодинамического воздействия, в ходе контрольных экспериментов гибель клеток детектировалась с помощью флуоресцентной микроскопией и смеси стандартных красителей. В ходе проведения экспериментов были накоплены данные об основных морфологических и оптических характеристиках 700 живых и некротических клетках. Разработанный алгоритм классификации имеет ошибку идентификации ложно некротической 12 %, а ложно живой клетки 1,7 %. Таким образом, разработанный метод классификации живых и некротических клеток может быть успешно использован для неинвазивного мониторинга клеток и оценки выживаемости клеток при внешнем воздействии.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и выполнена в рамках проекта № 18-32-00364.

Список литературы

1. Belashov A.V. et. al. // Optics Letters. 2016. V. 41. № 21. P. 5035-5038.
2. Rappaz B., Barbul A., Emery Y. et. al. // Cytometry Part A. 2008. V. 73. № 10. P. 895-903.

УДК 535(06)+004(06)

Л.А. ЗЫКОВА, Л.И. БУРМАК
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЭНДОСКОПИЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМ ОПОРНЫМ КАНАЛОМ

Предложена схема регистрации трёхмерной фазовой структуры труднодоступных объектов методом цифровой голографии с помощью жесткого эндоскопа и интерференционного модуля. Опорный пучок в таком модуле создается путем пространственной фильтрации с помощью одномодового волокна.

L.A. ZYKOVA, L.I. BURMAK
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

DIGITAL HOLOGRAPHIC ENDOSCOPY WITH FIBER-OPTIC REFERENCE CHANNEL

We present a scheme for registration of tree-dimensional phase structure of the hard-reach objects by digital holography using a rigid endoscope and an interference module. A reference beam in such module is created by spatial filtering with a single-mode fiber.

На сегодняшний день эндоскопический метод исследования является основным практическим способом получения оптической информации о труднодоступных объектах. Основное применение он нашел в области медицины и промышленном контроле. Используя методы цифровой голографии в эндоскопии, можно получить информацию о трёхмерной фазовой структуре исследуемого объекта [1-4].

В работе предложена схема цифрового голографического модуля для жесткого линзового эндоскопа, в котором опорный пучок создается с помощью одномодового волокна. В этой схеме (рис. 1) источник излучения 1 соединен с осветительным волокном 2 и одномодовым волокном 4. Часть света от источника излучения 1 поступает в волокно 2 для освещения исследуемого объекта, а остальное направляется в одномодовое волокно 4, с помощью которого формируется опорный пучок путем пространственной фильтрации излучения источника. Отраженное от объекта излучение собирается жестким эндоскопом 3, который строит изображение объекта. Таким образом, жесткий эндоскоп 3 играет роль объектного канала интерферометра, а одномодовое волокно 4 – опорного канала. Пучки на выходе из эндоскопа 3 и волокна 4 объединяются выходной оптической системой 5-6 и направляются на

матричный приемник излучения 7, на котором они формируют интерференционную картину. Для восстановления фазового профиля объекта зарегистрированная интерференционная картина обрабатывается алгоритмами цифровой голографии. В результате обработки получают информацию о внесенной объектом в световую волну фазовой задержке, которую впоследствии можно пересчитать в физические параметры исследуемого объекта (геометрические размеры или показатель преломления).

Результаты экспериментов демонстрируют эффективность описанной схемы в решении задач восстановления фазового профиля объектов.

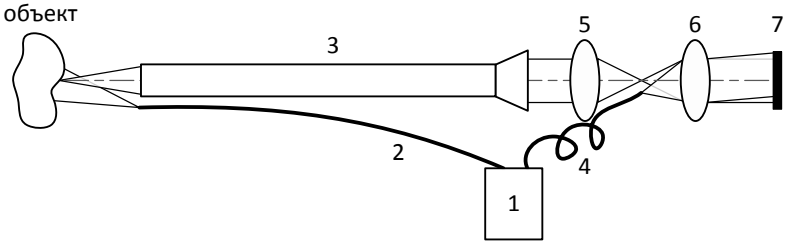


Рис. 1. Схема цифровой голографической эндоскопии
с оптоволоконным опорным каналом

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-38-00869.

Список литературы

1. Schedin S., Pedrini G., Tiziani H.J. // Appl. Opt. 2000. V. 39 (16). P. 2853.
2. Kolenovic E., Osten W., Klattenhoff C., Juptner W. // Appl. Opt. 2003. V. 42 (25). P. 5167-5172.
3. Ozcan M., Tayyar D. // Proc. SPIE. 2002. V. 9771. P. 97710A.
4. Delacrétaz Y., Shaffer E., Pavillon N., Kuhn J. et. al. // J. of Biomedical Optics. 2010. V. 15(6). P. 066014.

УДК 535(06)+004(06)

П.В. ПАВЛОВ, И.Э. ВОЛЬФ, И.Э. КУСКОВ, Р.Г. ХОБТА
Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОСТЕКЛЕНИЯ САМОЛЕТА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГОЛОГРАФИИ

Рассматриваются технические пути построения оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля (НК), принцип действия которого основан на использовании метода компьютерной голографии. Представлены результаты натурных испытаний предлагаемого комплекса для задач дефектоскопического контроля остекления кабины воздушного судна.

P.V. PAVLOV, I.E. WOLF, I.E. KUSKOV, R.V. HOBTA
Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A Gagarin, Voronezh

NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF AIRCRAFT GLAZING BY THE METHOD OF COMPUTER HOLOGRAPHY

The technical ways of constructing an optical-electronic complex of non-destructive testing (ND) are considered, the principle of which is based on the use of computer holography. The results of field tests of the proposed complex for the tasks of flaw detection inspection of the aircraft cockpit glazing are presented.

Существующие оптические устройства неразрушающего контроля, которые стоят на вооружении строевых частей ВКС не удовлетворяют предъявленным требованиям по точности. Для углубленного анализа параметров дефектов, таких как, размер дефекта, глубина залегания и другие, необходимо применять прецизионные оптические методы НК, такой как метод цифровой голографии.

В цифровой голографии существует две основные схемы записи: осевая, внеосевая. Выбор той или иной схемы зависит от решаемой задачи, а также достоинств и недостатков каждой из схем при её решении. Осевая схема используется при работе с прозрачными объектами [1]. Недостатком данной схемы является то, что полученные голограммы с помощью нее имеют низкое качество [2]. Достоинства внеосевой схемы заключается в том, получаемые голограммы имеют качество выше, чем при использовании осевой схемы [3]. Однако недостатком являются высокие требования к механической стабильности и когерентности света [4], поэтому при решении задачи НК остекления кабин воздушных судов

для записи цифровых голограмм целесообразно использовать осевую схему.

На кафедре электрооборудования (и оптико-электронных систем) ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж), в рамках научного направления по исследованию технических путей построении оптико-электронных систем НК разработан оптико-электронный комплекс, который позволяет осуществлять операции по дефектоскопическому контролю остекления самолета, используя метод компьютерной голографии. Управления комплексом НК осуществляется разработанным программным обеспечением.

В ходе исследования проведены эксперименты, которые демонстрируют возможности данного комплекса НК. На рис. 1а изображена голограмма дефекта (трещина) остекления, на рис. 1б представлено восстановленное его изображение дефекта с определением ширины раскрытия.

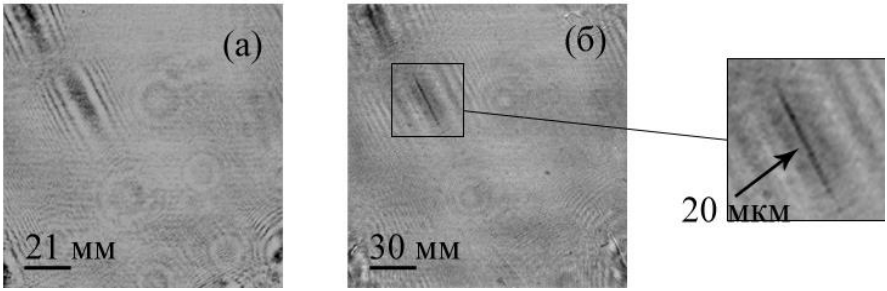


Рис. 1. Голограмма дефекта (а) и восстановленное изображение (б)

Таким образом, использование метода компьютерной голографии в задачах дефектоскопического контроля остекления кабин воздушных судов позволит повысить безопасность полетов авиапарка государственной авиации России.

Список литературы

1. Демин В.В., Степанов С.Г. Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосферы и океана. 1998. № 7. С. 671-676.

2. Gabor D. A new microscopic principle // Nature. 1948. V. 161. P. 777-778.

3. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // Journal of the Optical Society of America. 1962. V. 52. P. 1123-1130.

4. Yaroslavsky L. Digital holography and digital image processing principles, methods, algorithms // Kluwer Academic Publisher. 2004.

УДК 535(06)+004(06)

А.О. ГЕОРГИЕВА[1], А.В. БЕЛАШОВ[1,2], Н.В. ПЕТРОВ[1]
[1]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
[2]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

КОРРЕКЦИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМОЙ МАТРИЦЫ МИКРОЗЕРКАЛ И ВНЕОСЕВОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

В работе представлены результаты разработки экспериментальной установки для коррекции волнового фронта с помощью управляемой матрицы микрозеркал (DMD), основанной на формировании бинарной интерференционной картины и фильтрации первого дифракционного порядка в Фурье плоскости. Проведено исследование зависимости параметров дифракционных порядков и качества их фильтрации от задаваемых амплитудных и фазовых характеристик, корректирующих аберрации исходного волнового фронта. В ходе работы было также изучено влияние периода интерференционных полос на точность разделения дифракционных порядков и пространственное разрешение формируемого фазового распределения. Качество коррекции волнового фронта оценивалось с помощью разложения на полиномы Цернике.

A.O. GEORGIEVA[1], A.V. BELASHOV[1,2], N.V. PETROV[1]
[1]*ITMO University, Saint-Petersburg*
[2]*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

WAVEFRONT CORRECTION USING THE DIGITAL MICROMIRROR DEVICE AND OFF-AXIS DIGITAL HOLOGRAPHY

The paper presents results of the development of an experimental setup for wavefront correction using a digital micromirror device (DMD). The method is based on formation of a binary interference pattern and filtering of the first diffraction order in the Fourier plane. A dependence between the amplitude and phase characteristics and quality of diffraction orders filtration was investigated. Impact of the interference fringes thickness on the accuracy of diffraction order filtration and spatial resolution of the obtained phase distribution was also studied. The quality of the wavefront correction was estimated using Zernike polynomials decomposition.

Пространственная модуляция амплитуды и фазы волнового фронта может быть успешно использована во многих приложениях, в частности, для целей оптической микроскопии, коммуникаций, фокусировки излучения в непрозрачных средах и визуализации внутренних слоев

непрозрачных материалов, спектральной фильтрации или в перестраиваемых светоделителях [1, 2]. Одним из подходов для независимой амплитудно-фазовой модуляции волнового фронта может быть использование управляемой матрицы микрозеркал (DMD от англ. Digital Micromirror Device). Несмотря на то, что данный прибор обеспечивает быструю модуляцию света с высоким пространственным разрешением по сравнению с другими устройствами модуляции света (LCoS-SLM или MEMS) [2], использование матрицы микрозеркал самой по себе позволяет осуществлять лишь бинарную модуляцию света. Для независимой манипуляции амплитудными и фазовыми характеристиками волнового фронта может быть использован метод, описанный в работе [3].

Целью работы является численное и экспериментальное исследование влияния параметров задаваемой на DMD бинарной интерференционной картины и фильтрации первого дифракционного порядка на формируемое фазовое распределение. Было проведено численное исследование качества фильтрации первого дифракционного порядка при изменении задаваемых амплитудных и фазовых характеристик. Кроме того, была исследована зависимость пространственного разрешения формируемого амлитудно-фазового распределения от периода интерференционных полос на бинарной интерференционной картине и размера окна фильтрации первого дифракционного порядка.

В качестве задаваемого фазового распределения использовалась штриховая мира. В ходе экспериментального исследования было показано, что для используемых параметров экспериментальной установки оптимальный диаметр апертуры для фильтрации первого дифракционного порядка составил 2,25 мм. Увеличение данного параметра приводит к появлению паразитных полос, сформированных не подвергнутой фильтрации частью первого дифракционного порядка, а его существенное снижение уменьшает пространственное разрешение.

Список литературы

1. Goorden S.., Bertolotti J., Mosk A.P. // Optics Express. 2014. V. 22. P. 17999-18009.
2. Yoon T. et. al. // Opt. Laser Technol. 2018. V. 104. P. 17-25.
3. Conkey D.B. et. al. // Optics Express. 2012. V. 20 (2). P. 1733.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, И.Д. КУЗЬМИН,
Д.Ю. МОЛОДЦОВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ ДВУХ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Современные микрозеркальные модуляторы света обладают крайне высоким быстродействием – до 32000 бинарных изображений в секунду. Это открывает возможности для создания высокоскоростных систем оптического кодирования информации. Осуществлена первая экспериментальная реализация схемы оптического кодирования информации с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света. Представлены результаты оптических экспериментов.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, I.D. KUZMIN,
D.Yu. MOLODTSOV, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute

SCHEME OF OPTICAL ENCRYPTION WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION BASED ON TWO MICROMIRROR LIGHT MODULATORS

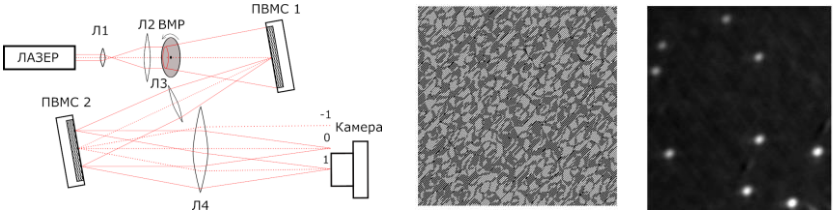
State of the art micromirror DMD light modulators offer unprecedented frame rate of up to 32000 frames per second. This makes it possible to create high speed information optical encryption systems. The first experimental setup of optical encryption under spatially incoherent illumination based on two DMD SLMs had been created. Results of optical experiments are demonstrated.

Для создания высокоскоростной системы кодирования необходимо использовать быстродействующие устройства ввода. Современные микрозеркальные (МЗ) пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) обладают чрезвычайно высоким быстродействием – до 32000 бинарных изображений в секунду при разрешении в 1920×1080 пикселей. По результатам моделирования была продемонстрирована возможность кодирования потока информации до 7 Гбит/с.

Схема экспериментальной установки оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух МЗ ПВМС

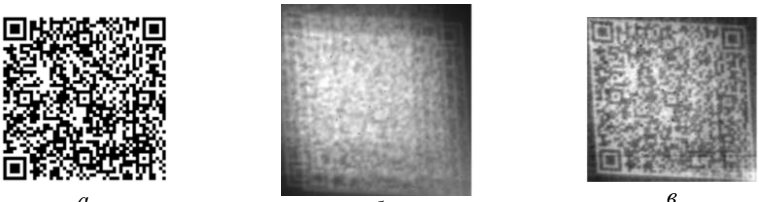
представлена на рис. 1*а*. В качестве объекта кодирования использовался QR-код размером 51 × 51 отсчет, отображавшийся МЗ ПВМС1 и представленный на рис. 2*а*. Кодирующая компьютерно-синтезированная амплитудная бинарная фурье-голограмма, содержащая 300 × 300 отсчетов, выводилась на МЗ ПВМС2 и показана на рис. 1*б*. На рис. 1*в* представлен оптически зарегистрированный отклик голограммы в первом порядке дифракции. Для его регистрации на ПВМС1 выводилось черное поле с единственным белым пикселем в центре.

Кодированное изображение представлено на рис. 2*б*. Декодирование проводилось численно методом инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову. Декодированное изображение показано на рис. 2*в*.



а *б* *в*

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (*а*), кодирующая голограмма (*б*) и ее отклик (*в*)



а *б* *в*

Рис. 2. Входное (*а*), кодированное (*б*) и декодированное (*в*) изображения

Осуществлена первая экспериментальная реализация схемы оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света. Результаты оптических экспериментов демонстрируют умеренный уровень шума: нормированное среднеквадратическое отклонение декодированного изображения от оригинала – 0,17, декодированный QR-код успешно распознан.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Д.С. ГОНЧАРОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ,
Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ, Н.А. ТРОЦЕНКО,
Т.Ш. ФАЗЛИЕВ, И.Ю. ЭРЬКИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СРАВНЕНИЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНОГО И ФАЗОВОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПВМС КАК УСТРОЙСТВ ВВОДА ИНВАРИАНТОГО ОПТИКО-ЦИФРОВОГО КОРРЕЛЯТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе приведены результаты моделирования работы инвариантных оптических корреляторов с различными типами пространственно-временных модуляторов света, используемых в качестве устройства ввода изображений. Для этих корреляторов произведено сравнение результатов моделирования корреляционного распознавания различных наборов изображений.

N.N. EVTIKHIEV, D.S. GONCHAROV, E.Yu. ZLOKAZOV,
N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV, N.A. TROTSENKO,
T.S. FAZLIEV, I.Yu. ERKIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

COMPARISON OF MICRO-MIRROR AND PHASE LIQUID CRYSTAL SLM AS AN IMAGE INPUT DEVICES IN THE INVARIANT OPTICAL-DIGITAL CORRELATOR

The results of modeling of the working of two invariant optical correlators with different type of SLM as an image input device are presented. For these correlators, a comparison of the results of modeling correlation recognition of different sets of images is made.

Преимущество оптических методов обработки информации заключается в том, что они обладают возможностью параллельной обработки массивов данных. Это означает что, теоретически оптико-цифровые системы возможно сделать более быстрыми и энергоэффективными, чем электронные схемы.

Особенно перспективной оптико-цифровой системой является оптический коррелятор, в котором возможно выполнение таких типов вычислений как свёртка и корреляция, что позволяет осуществлять корреляционное распознавание объектов. В них могут использоваться

различные пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) для ввода изображений в оптическую систему. Для реализации оптического коррелятора наибольший интерес представляют 4f схемы [1], в одной из которых для ввода изображения используются микрозеркальные (DMD) ПВМС, а в другой – фазовый ЖК ПВМС, в то время как фильтры в обоих системах вводятся с помощью микрозеркального ПВМС.

ПВМС выполняет модуляцию лазерного излучения согласно поданному на него сигналу. Современные отражательные фазовые ЖК и микрозеркальные ПВМС имеют глубину модуляции 8 бит и обладают хорошим коэффициентом заполнения. Их основным различием является быстродействие, которое у ЖК составляет около 100 Гц, а у DMD модуляторов – свыше 30 кГц. При этом, для вывода изображения на фазовый ПВМС нужно поставить в соответствие каждому значению яркости изображения свое значение фазы [2], тогда как для вывода на микрозеркальный модулятор изображение необходимо бинаризовать, что приводит к потери части информации.

Для моделирования корреляционного распознавания использовались полутоновые спутниковые снимки различных самолётов. Распознавание производилось с использованием синтезированного корреляционного фильтра MINACE (minimum noise and correlation energy) [3]. Для бинаризации изображений использовались различные методы (метод Брэдли, метод Ниблэка, и т.д.). С целью улучшения качества распознавания, к изображениям перед бинаризацией применялось выделение признаков с помощью HOG [4]. Полученные результаты показали, что качество распознавания при применении фазового ЖК ПВМС для ввода изображений качество распознавания лучше, чем при использовании DMD модулятора. При этом, применение HOG-дескриптора, способно улучшить качество распознавания бинаризированных изображений.

Список литературы

1. Van der Lugt A. Signal detection by complex spatial filtering // IEEE Trans. Inform. Theory. 1964. V. IT-10. № 2. P. 139-145.

2. Goncharov D.S., Ponomarev N.M., Starikov R.S. Phase SLM as an image input device in the invariant optical-digital correlator // VIII International conference on photonics and information optics, 2019.

3. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation pattern recognition. Cambridge University Press, 2005.

4. Navneet D., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005.

УДК 535(06)+004(06)

М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВВОДОМ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены особенности работы жидкокристаллических пространственных модуляторов света с параллельным вводом входных сигналов и перспективы их применения в ряде оптических систем обработки информации.

M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

APPLICATION OF LIQUID-SPATIAL SPATIAL LIGHT MODULATORS WITH PARALLEL INPUT OF SIGNALS IN OPTICAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS

Features of spatial light modulators with parallel input of signals operation and perspectives of their use in a number of optical information processing systems has been reviewed.

Потенциальное быстродействие оптических систем обработки информации ограничивается, как правило, быстродействием устройств ввода и вывода информации. Одними из наиболее быстродействующих устройств ввода сигналов в оптические системы являются акустооптические модуляторы (АОМ), позволяющие вводить до 1000 и более разрешимых элементов за 1 микросекунду. Быстродействие многоканальных АОМ еще больше – пропорционально числу каналов модулятора, но такие АОМ не выпускаются серийно. Малопригодны АОМ и для ввода двумерных сигналов в системах обработки изображений.

Перспективным устройством ввода сигналов и изображений в оптические системы обработки информации являются жидкокристаллические матрицы с электронным управлением, которые выпускаются промышленностью для видеоаппаратуры. Выпускаются также и специальные жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ЖК ПМС) для когерентных оптических систем

обработки информации [1]. Число разрешимых элементов в таких устройствах может достигать нескольких тысяч по каждой из координат, что позволяет одновременно вводить большой объем информации в оптический процессор. Однако ввод сигналов или изображений в сам ПМС осуществляется поэлементно, за сравнительно большое время, как правило, не менее 1 - 10 миллисекунд.

Нами была предложена структура устройства управления ЖК матрицей, позволяющая осуществлять параллельный ввод элементов строки входных сигналов в ЖК ПМС [2]. При таком вводе строки матрицы с помощью драйвера поочередно подключаются к параллельным входам системы, при этом входные сигналы параллельно передаются на пиксели подключаемой строки. При скорости драйвера строк матрицы 100 МГц, время, затрачиваемое на ввод двумерного сигнала из 1000 × 1000 элементов, составит около 10 микросекунд. Такое устройство по быстродействию приближается к многоканальному АОМ, при этом оно удобно для ввода двумерных сигналов в простых оптических системах обработки изображений. Оценки показывают, что быстродействие целого ряда схем оптической обработки с ЖК ПМС на входе может увеличиться при параллельном вводе сигналов на два порядка [3].

Для реализации параллельного ввода большого числа сигналов в ПМС из памяти цифрового процессора или от других источников требуется применение соответствующего устройства управления. Возможность создания такого устройства косвенно подтверждается реализацией параллельного ввода сигналов в 256 каналов оптической системы в коммерческом компьютере Enlight-256, в котором оптический узел используется для увеличения быстродействия компьютера.

В работе рассмотрены схемы электронного управления элементами ЖК матриц с параллельным вводом и схемы оптической обработки с использованием таких ЖК ПМС – анализаторов спектра и корреляторов, как одномерных так и двумерных сигналов, как одноканальных, так и многоканальных устройств. Обсуждаются возможности улучшения параметров этих систем за счет увеличения быстродействия устройства ввода, а также способы адаптации одноканальных источников сигнала к многоканальному вводу сигналов в ЖК ПМС.

Список литературы

1. www.holoeye.com

2. Kuzmin M.S., Rogov S.A. // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2016. V. 25. No. 2. P. 114-117.

3. Кузьмин М.С., Рогов С.А. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VIII Межд. конф.: сб. науч. ст. / СПб.: СПбГУТ, 2019. Т. 1. С. 631-640.

УДК 535(06)+004(06)

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОПИКСЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Экспериментально реализованы составляющие однопиксельной камеры, включающей детектор, микрозеркальный модулятор и фокусирующие элементы. Проведены оптические эксперименты по регистрации излучения от объектов. Используя методы compressive sensing, восстановлены изображения объектов.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION OF SINGLE-PIXEL CAMERA

A single-pixel camera based on detector, micromirror modulator, laser and focusing elements was experimentally implemented. Optical experiments were performed. Object images were reconstructed by compressive sensing.

Развитие методов вычислительной фотографии, в том числе технологий на основе compressive sensing (CS [1]) позволили восстанавливать информацию из частично потерянного сигнала из наборов сигналов. Практическим примером CS является так называемая «однопиксельная камера», для регистрации излучения от объекта, которая использует однопиксельный детектор, фокусирующие элементы и прореживание, например, микрозеркальным модулятором (DMD – Digital Micromirror Device) [2]. На DMD выводятся бинарные массивы значений: случайные [3] либо, например, матрицы Адамара [4]. Пример схемы представлен на рис. 1. Детектор регистрирует яркость, полученную как свертку излучения от объекта и отображенных на DMD значений.

Проведены оптические эксперименты на основе экспериментально реализованной однопиксельной камеры. Использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения 632,8 нм и мощностью 10 мВт. Размер экрана микрозеркального модулятора составлял 1024 × 768 пикселей, однако использовался лишь определенный участок 128 × 128 пикселей. На этот участок попадало излучение, прошедшее через объект. Проведены эксперименты по восстановлению изображений объектов методом CS на основе полученного набора регистраций. Качество восстановления

изображений оценивалось по величине пикового отношения сигнал/шум. Было проведено до 1600 регистраций, что составило менее 10 % информативности (числа пикселей) исходного изображения (размером 128 × 128 пикселей). Примеры результатов восстановления показаны на рис. 2. Как видно, на рис. 2*в* заметны контуры изображения объекта.

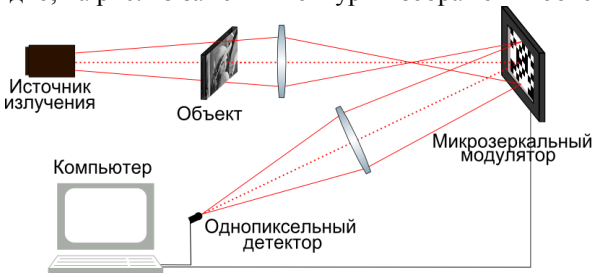


Рис. 1. Схема регистраций сигнала однопиксельным детектором

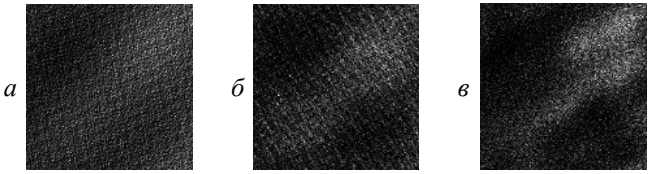


Рис. 2. Восстановленные изображения объекта при числе регистраций, составляющей 1,2 % (*а*), 3,7 % (*б*) и 8,5 % (*в*) от числа пикселей объекта

Таким образом, экспериментально реализованы все основные элементы, образующие однопиксельную камеру. Подобные системы используются и могут быть использованы для быстрого получения информации в излучении различного спектрального диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-07-00829.

Список литературы:

1. Candès E.J., Wakin M.B. An Introduction to compressive sampling // IEEE Signal Processing Magazine. 2008. V. 25 (2). P. 21-30.

2. Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J. Principles and prospects for single-pixel imaging // Nature Photonics. 2019. V. 13 (1). P. 13-20.

3. Kulakov M.N., Starikov R.S., Cheremkhin P.A. Objects reconstruction by compressive sensing from single-pixel registrations using DMD // KnE Energy & Physics. 2018. V. 3 (3). P. 509-522.

4. Zhang Z., Wang X., Zheng G., Zhong J. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging // Optics Express. 2017. V. 25. P. 19619-19639.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, В.Г. РОДИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКОЕ ПОДАВЛЕНИЕ СПЕКЛ-ШУМА ДЛЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ВРЕМЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагается методика подавления спекл-шума при оптическом восстановлении изображений с дифракционных оптических элементов (ДОЭ) методом временного интегрирования разреженных изображений. Для этого исходное изображение раскладывается на несколько взаимодополняющих разреженных, для каждого из которых синтезируется свой ДОЭ. При достаточно быстром отображении такого набора ДОЭ на модуляторе света, отдельные изображения усредняются в единое полное изображение, при этом, поскольку отдельные изображения разрежены, спекл-шум в них существенно снижен по сравнению с полным изображением. Экспериментально продемонстрировано превосходство предложенной методики над простым усреднением в 1,3 раз.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, V.G. RODIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICAL SUPPRESSION OF SPECKLE NOISE FOR DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS BY TIME INTEGRATION OF SPARSE IMAGES

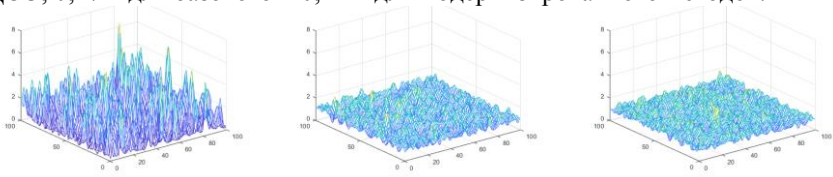
The technique of speckle-noise suppression for image restoration from diffraction optical elements (DOE) by time integration of sparse images is presented. Original image is decomposed into several complementary sparse images. For each one corresponding DOE is synthesized. When such DOE set is displayed on spatial light modulator with sufficiently high framerate, separate images merge into single whole image. Also, because separate images are sparse, speckle-noise in them is greatly reduced compared to single whole image. By results of optical experiments proposed technique has demonstrated 1.3 times better speckle-noise suppression compared to simple averaging.

Спекл-шум приводит к существенному снижению качества оптического восстановления изображений с дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Наиболее распространенный метод подавления спекл-шума – мультиплицирование ДОЭ, то есть его многократное повторение вдоль каждой из осей. При этом размер элемента

формируемого изображения пропорционально уменьшается, также уменьшается степень перекрытия соседних элементов, и спекл-шум снижается. Недостаток метода заключается в том что формируемое изображение становится разреженным и визуально тусклым.

Другой метод подавления спекл-шума – отображение набора ДОЭ, содержащих одно и тоже изображение, но синтезированных с использованием различных стартовых случайных фазовых распределений. При динамическом отображении на модуляторе света с достаточно высокой частотой кадров реконструируемые изображения усредняются в одно, и спекл-шум подавляется примерно в корень из числа ДОЭ раз. В данной работе предложена модернизация этого метода. Вместо того, чтобы синтезировать ДОЭ, содержащие полное изображение, синтезируются ДОЭ, содержащие часть пикселей полного изображения. При их усреднении формируется полное изображение. За счет того, что каждое отдельное изображение разрежено, формирующийся спекл-шум оказывается заметно слабее, как и в случае мультиплицированного ДОЭ, но, поскольку набор ДОЭ содержит все пиксели исходного изображения, формирующееся в результате изображение оказывается полным.

Были проведены оптические эксперименты по подавлению спекл-шума базовым методом и модернизированным с использованием нескольких наборов из 9 ДОЭ. Результаты приведены на рис. 1. Значения спекл-контраста составили 0,84 без подавления шума для одиночного ДОЭ, 0,27 – для базового и 0,21 – для модернизированного методов.



а *б* *в*

Рис. 1. Распределение яркости во фрагменте изображения 100 × 100 пикселей с постоянной яркостью оптически восстановленного с: одиночного ДОЭ (*а*); набора из 9 ДОЭ, содержащих полное изображение (*б*); набора из 9 ДОЭ, содержащих разреженные изображения (*в*)

Таким образом, предложенный метод подавления спекл-шума продемонстрировал снижение спекл-контраста в 1,3 раз по сравнению с простым усреднением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ,
Р.С. СТАРИКОВ, Н.А. ТРОЦЕНКО
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВАРИАНТНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО ФИЛЬТРА ТИПА «MAXIMUM MARGIN»

Осуществлен синтез корреляционного фильтра типа «maximum margin» (MMCF), сочетающего в себе возможности алгоритмов машинного обучения и корреляционных фильтров. Произведено сравнение качества распознавания MMCF с другими корреляционными фильтрами.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV,
R.S. STARIKOV, N.A. TROTSENKO
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODELLING OF MAXIMUM MARGINE CORRELATION FILTER

By combining the features of machine learning algorithms and correlation filters, was designed the Maximum Margin Correlation Filter (MMCF). The recognition quality of MMCF was compared with other correlation filters.

Задача распознавания, а именно локализация и классификация объектов, на практике возникает очень часто в самых различных областях деятельности. Например, при автоматическом распознавании цели, в биометрии при идентификации, в разработке систем машинного зрения.

В настоящее время разработано множество методов классификации изображений. К ним относятся различные методы статистического машинного обучения, в том числе, нейронные сети. Как правило, обучение проводят на изображениях, где объект должен быть расположен строго по центру. Тем самым в алгоритмы неявно заложено предположение о том, что задача локализации уже решена.

Корреляционные фильтры весьма успешно справляются с задачей локализации объектов на сцене. Важно также отметить, что их можно реализовать в оптических системах, которые обладают гораздо большим быстродействием по отношению к традиционным цифровым системам. Однако качество классификации с помощью корреляционных фильтров недостаточно хорошее. Это связанно с тем, что при корреляции изображений двух объектов возникает корреляционный пик, даже если

они не относятся к одному классу, в результате чего классификация объекта производится исходя из параметров корреляционного пика, таких как его высота и форма. С этой целью могут вводиться различные метрики, однако они не решают полностью проблему ошибок при определении класса объекта. С другой стороны, алгоритмы машинного обучения достаточно неплохо справляются с задачей классификации, однако в них отсутствует возможность локализации объекта, а также их нельзя реализовать в оптических системах.

В связи с этим целью данной работы является реализация алгоритма, сочетающего в себе достоинства метода опорных векторов в области классификации объектов и способности корреляционных фильтров быстро и качественно определять их местонахождение на сцене.

В ходе работы была осуществлена разработка программного обеспечения для синтеза инвариантного корреляционного фильтра максимального отступа (MMCF) [1]. Для синтеза корреляционных фильтров были созданы обучающие наборы, представляющие из себя рендеры 3D-моделей (рис. 1). Для исследования качества распознавания использовались тестовые наборы изображений, являющихся спутниковыми снимками (рис. 2). С целью сравнения качества распознавания были выбраны корреляционные фильтры MACH и MINACE [2]. Для каждого КФ были проведены распознавания всех тестовых наборов. Результаты показали превосходство качества распознавания MMCF по отношению к MACE и MINACE.

Рис. 1. Рендеры 3D-модели объекта

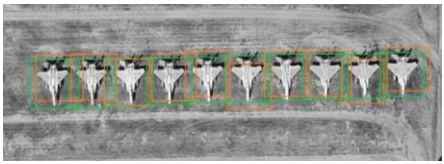


Рис. 2. Пример распознавания объектов на спутниковом снимке

Список литературы

1. Rodriguez A., Boddeti V., Vijaya Kumar B., Mahalanobis A. Maximum margin correlation filter: A new approach for localization and classification // IEEE Trans. Image Processing, 2012.

2. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition Cambridge University Press, 2005.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ,
Н.А. ТРОЦЕНКО, Т.Ш. ФАЗЛИЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВАРИАНТНОГО ОПТИКО-ЦИФРОВОГО КОРРЕЛЯТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ С БИНАРНЫМ ВВОДОМ ДАННЫХ

Представлены результаты компьютерного моделирования работы оптического коррелятора с бинарным вводом данных с использованием инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров. Рассмотрены различные варианты распознавания контурных изображений простой и сложной формы.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV,
N.A. TROTSENKO, T.S. FAZLIEV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODELING OF INVARIANT OPTICAL-DIGITAL CORRELATOR USING BINARY INPUT DATA

The results of modeling of the working of the optical correlator with binary input data using invariant optimal trade-off correlation filters. The cases of different recognition of simple and complex contour images are considered.

Корреляционное распознавание является одним из возможных способов локализации и классификации объектов различных форм. Основное преимущество данного способа – высокая скорость, достигаемая за счет использования пространственно – временных модуляторов света (ПВМС) в оптических корреляторах для вывода корреляционных фильтров (КФ). Наибольший интерес в данном отношении представляют микрозеркальные ПВМС, производящие бинарную амплитудную модуляцию с максимально достижимой частотой порядка 32 кГц.

Для вывода изображений на микрозеркальные ПВМС требуется осуществить их бинаризацию, что ведет к потере информации. Помимо бинаризации всего изображения можно выделять лишь его контур, определяя резкие переходы в яркости изображения. Для этого необходима предобработка изображения с использованием алгоритмов выделения контуров нужного объекта.

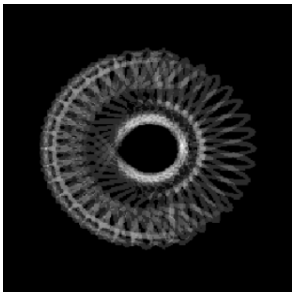


Рис. 1. Пример распознаваемого контурного изображения

Рис. 2. Изображение амплитуды корреляционного фильтра

В данной работе произведено компьютерное моделирование распознавания контурных изображений, полученных при помощи различных алгоритмов выделения контуров. Были использованы следующие фильтры MACH (maximum average correlation height) [1] и MINACE (minimization of noise and average correlation energy) [2]. Распознавание проводилось на примере объектов как простой формы, так и сложной формы. Также были рассмотрены случаи бинарного зашумления входного изображения и его влияние на распознавательные свойства моделируемого коррелятора.

Список литературы

1. Shaulskiy D.V. et. al. // Proc. SPIE. 2015. V. 9598.
2. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. // Opt. Eng. 2008. V. 47(6).
3. Molodtsov D.Yu. et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 338-342.

УДК 535(06)+004(06)

Е.А. КУРБАТОВА, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВАРЬИРОВАНИЕ ВЕСОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ МАТРИЦ ПРИ БИНАРИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ОПЕРАЦИЕЙ ДИФФУЗИИ ОШИБКИ

Для задачи бинаризации цифровых голограмм проведена оценка влияния значений и типов весовых коэффициентов матриц операции диффузии ошибки на качество восстановленных изображений. Определены оптимальные варианты расчета коэффициентов, обеспечивающие наилучшее качество восстановления.

E.A. KURBATOVA, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MATRIXES WEIGHT COEFFICIENTS VARIATION AT DIGITAL HOLOGRAMS BINARIZATION BY ERROR DIFFUSION

In the paper, effect of error diffusion matrices weight coefficients on reconstruction quality of binarized digital holograms was analyzed. Optimal versions of calculation of weight coefficients ensuring the best reconstructed images quality are determined.

Операция диффузии ошибки [1-4] относится к числу широко применяемых методов бинаризации и сжатия как изображений, так и цифровых голограмм. Основные параметры операции – число и величины весовых коэффициентов. Эти коэффициенты влияют на направление распространения и величину ошибки, распространяемой среди пикселей изображения. Однако коэффициенты фиксированы для каждого метода и не учитывают характеристики бинаризуемых изображений. Поэтому для разных типов изображений лучшее качество достигается использованием различных, наиболее подходящих для каждого случая методов.

Для бинаризации цифровых внеосевых голограмм было реализовано 17 методов диффузии ошибки, в том числе 5 методов точечной диффузии [3]. Оценивалось влияние весовых коэффициентов на качество восстановления от яркостных характеристик голограмм и порогов, определенных методами Отцу, Киттлера и Ридлера-Кальварда [5].

На рис. 1 показаны примеры восстановленных изображений плоского объекта (*а-г*) и 3D-сцены (*д-з*) с голограмм, бинаризованных алгоритмом диффузии ошибки с различными матрицами весовых коэффициентов.

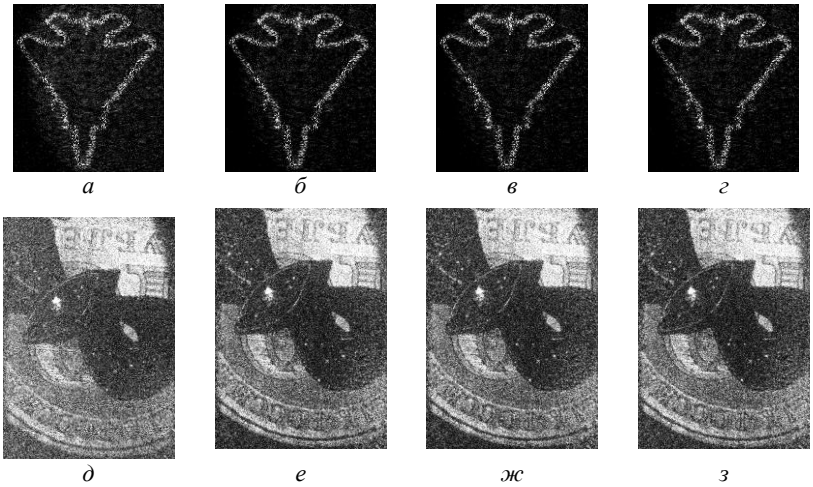


Рис. 1. Примеры восстановленных изображений с голограмм плоского объекта (*а-г*) и объемной сцены (*д-з*) при использовании алгоритма диффузии ошибки с использованием стандартной матрицы Флойда-Стенберга (*а*, *д*) и матриц весовых коэффициентов, зависящих от среднего (*б*, *е*) и медианного (*в*, *ж*) значений яркости голограммы и порогового значения по Отцу (*г*, *з*)

Получено, что, например, при использовании коэффициентов по средней яркости наблюдается повышение качества восстановления на 4-6 % (по индексу структурного сходства, пиковому отношению сигнала к шуму) в сравнении со стандартной диффузией ошибки при одинаковом направлении распространения коэффициентов. Данные результаты позволят выбрать метод, обеспечивающий наиболее высокое качество восстановления при бинаризации голограмм различных типов объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 18-79-00277.

Список литературы

1. Floyd R.W., Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial grey scale // Proceedings of the Society of Information Display. 1976. V. 17. P. 75-77.

2. Guo J.M., Liu Y.F. Improved dot diffusion by diffused matrix and class matrix co-optimization // IEEE Transactions on Image Processing. 2009. V. 18. № 8. P. 1804-1816.

3. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Binarization of digital holograms by thresholding and error diffusion techniques // Digital Holography and 3-D Imaging. OSA. 2019. P. Th3A.22.

4. Bin Y. et. al. Improving image quality in visual cryptography. Heidelberg: Springer, 2020.

5. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarization of off-axis digital holograms // Opt. Lasers Eng. 2019. V. 115. P. 119-130.

УДК 535(06)+004(06)

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Д.А. РЫМОВ, Р.С. СТАРИКОВ,
П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СИНТЕЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Машинное обучение относится к числу наиболее активно развивающихся направлений, в том числе в области оптики и фотоники. Для возможности численного расчета компьютерных голограмм реализован метод, использующий машинное обучение. Используя обученную модель, синтезирован набор голограмм и проведено восстановление изображений.

N.N. EVTIKHIEV, D.A. RYMOV, R.S. STARIKOV,
P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

COMPUTER-GENERATED HOLOGRAPHY VIA MACHINE LEARNING

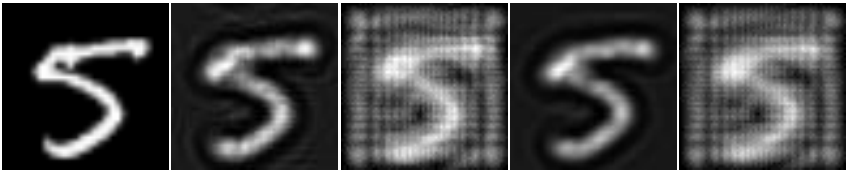
Machine learning is one of the most actively advancing computational tools in many fields, including optics and photonics. A learning-based method for hologram generation was implemented. Using trained model a number of holograms were generated and images were reconstructed.

В последние годы методы машинного обучения нашли большое количество применений в областях информационной оптики и голографии [1, 2]. Такие методы могут снизить вычислительную нагрузку и уменьшить время расчетов, по сравнению с традиционными методами [3].

К числу задач, где можно использовать машинное обучение, относится синтез компьютерных голограмм и дифракционных оптических элементов [4], которые могут использоваться в качестве фокусирующих элементов [5], для создания 3D-сцен [6], распознавания изображений и других задач [7]. К числу распространенных методов синтеза оптических элементов относятся однопроходные методы [8] и итеративные алгоритмы наподобие методов «пинг-понг» [9], которые не всегда позволяют оперативно синтезировать дифракционные элементы.

Для демонстрации применимости принципов машинного обучения, реализован метод синтеза амплитудных и фазовых голограмм на основе набора распределений интенсивностей. На рис. 1 представлен пример

исходного изображения (*а*), синтезированных методом прямого расчета дифракции (*б*) и с использованием обученной модели (*г*) амплитудной голограммы; а также результаты восстановления изображений с них (*в*, *д*).



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 1. Исходное изображение (а), амплитудная голограмма, синтезированная методом прямого расчета дифракции (б) и обученной моделью (г); интенсивности восстановленных с них изображений (в, д) соответственно

Как видно из рис. 1, восстановленные изображения являются сопоставимыми друг с другом по качеству (коэффициент корреляции равен 0,991), а коэффициенты корреляции с исходным объектом составили 0,762 (рис. 1*в*) и 0,755 (рис. 1*д*). Полученные результаты демонстрируют возможность оперативного синтеза голограмм и дифракционных оптических элементов с применением машинного обучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 18-79-00277.

Список литературы

1. Liu T., de Haan K., Rivenson Y. et. al. Deep learning-based superresolution in coherent imaging systems // Sci. Rep. 2019. V. 9. P. 3926.

2. Jo Y., Cho H., Lee S. et al. Quantitative phase imaging and artificial intelligence: a review // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. V. 25 (1). P. 1-14.

3. Rivenson Y., Zhang Y., Gunaydin H. et. al. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks // Light Sci. Appl. 2017. V. 7. P. 17141-17141.

4. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V. et. al. Machine learning methods for digital holography and diffractive optics // Procedia Computer Science. 2019 (in publishing).

5. Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Methods for computer design of diffractive optical elements // USA, Wiley. 2002.

6. Yamamoto Y., Nakayama H., Takada N. et. al. Large-scale electroholography by HORN-8 from a point-cloud model with 400,000 points // Optics Express. 2018. V. 26. P. 34259-34265.

7. Lu T., Chao T.-H. Advances in pattern recognition research // Nova Science Publishers. 2018.

8. Brown B.R., Lohmann A.W. Computer-generated binary holograms // IBM Journal of Research and Development. 1969. V. 13 (2). P. 160-168.

9. Кулаков М.Н., Поршнева Л.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Расчет киноформов объемных сцен методом «пинг-понг» // Сборник трудов V Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 454-455.

УДК 535(06)+004(06)

В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МАТРИЧНЫЙ КОНТЕЙНЕР ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Для использования в различных системах оптической обработки информации разработан новый матричный контейнер цифровых данных, основанный на кодах коррекции ошибок. Проведено численное моделирование использования разработанного контейнера в системе оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением.

V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MATRIX CONTAINER OF DIGITAL DATA FOR USE IN OPTICAL PROCESSING SYSTEMS

We are proposing new matrix container of digital data for use in optical processing systems. The proposed container is based on an error correction code. Numerical simulation of use of the developed container in the optical encryption system with spatially incoherent illumination is carried out.

Одним из популярных способов представления цифровой информации в графическом виде в системах оптической обработки данных является использование QR-кодов. Его главное преимущество — устойчивость к шумам, обеспечивающая безошибочное излечение информации даже если значительная часть самого QR-кода повреждена. Эта устойчивость обусловлена использованием кодов коррекции ошибок.

Однако изначально QR-коды разрабатывались для промышленности, и принятые сейчас стандарты зачастую не являются оптимальными для систем оптической обработки информации. Предлагаемый новый матричный контейнер основан на тех же принципах, что и QR-коды, однако обладает большей гибкостью в выборе параметров и может быть специализирован под нужды конкретной оптической системы.

Предложенный контейнер обладает следующими параметрами и диапазонами параметров:

– размер от 64 отсчётов по одной стороне, с произвольным соотношением сторон;

– степень коррекции ошибок от 0,2 до 40 % при соответствующей плотности записи информации (отношении количества бит выходной информации к количеству бит упаковываемой информации) от 98 до 27 %;
– нечувствительность к типу и формату упаковываемой информации (используется битовое представление файлов);
– возможность упаковки любого объёма данных в последовательность связанных между собой контейнеров;
– отсутствие демаскирующих неизменных служебных блоков, аналогичных поисковым и выравнивающим узорам QR-кодов;
– возможность создания вокруг контейнера контура неправильной формы и произвольной ширины.

На рис. 1 представлены изображение в формате jpg размером 28 x 128 отсчётов (рис. 1*а*) и оно же, упакованное в последовательность из 4 связанных между собой контейнеров размером 256 x 128 отсчётов, с шириной контура 10 %, степенью коррекции ошибки 5 % (рис. 1*б*-*д*).

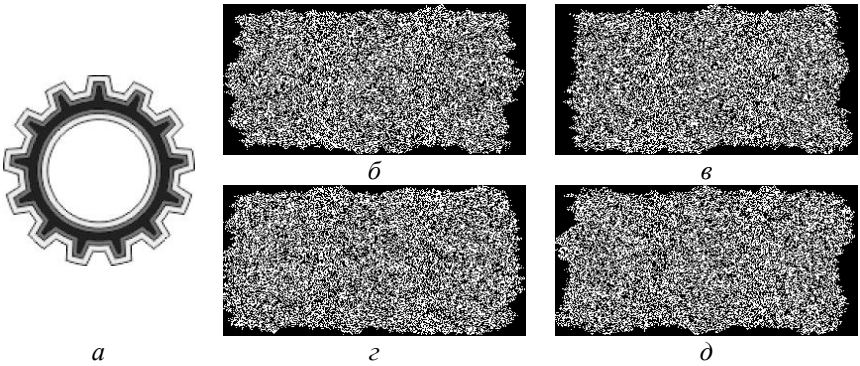


Рис. 1. Упаковываемая информация в виде jpg-изображения (*а*), четыре связанных между собой контейнера, содержащих упакованную информацию (*б*-*д*)

Проведённые численные эксперименты по использованию разработанного контейнера в системе оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением продемонстрировали его эффективность. Безошибочное восстановление кодируемой информации возможно при использовании ключей с нормированной средней энергией вплоть до 0,1 при степени коррекции ошибок 5 %.

УДК 535(06)+004(06)

Д.С. ГОНЧАРОВ, Е.К. ПЕТРОВА, Н.М. ПОНОМАРЕВ,
Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦВЕТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ЗАШУМЛЕННОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Приведены результаты моделирования корреляционного распознавания цветных субпиксельных изображений с учётом особенностей цветовых моделей RGB и Lab в условиях зашумленных изображений.

D.S. GONCHAROV, E.K. PETROVA, N.M. PONOMAREV,
R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

POSSIBILITIES OF USING COLOR INFORMATION FOR DETECTION AND RECOGNITION OF SUB-PIXEL OBJECTS UNDER CONDITIONS OF NOISE IMAGES

The results of modeling the correlation recognition of color subpixel images are presented taking into account the features of the RGB and Lab color models in noisy images.

В данной работе приведены результаты моделирование по применению инвариантных корреляционных фильтров (КФ) [1-4] при распознавании цветных субпиксельных изображений. Увеличить производительность распознавания и соответственно повысить его качество возможно при использовании дополнительной информации о цвете. Целью работы является исследование возможностей использования информации в различных цветовых каналах при корреляционном распознавании объектов интереса одинаковой формы, но разной окраски на зашумленном фоне. При моделировании применялись варианты КФ с минимумом энергии корреляции и с максимальной высотой корреляционного пика [2]. На основании ранее проведенных исследований были выбраны две основные модели RGB и Lab. В модели RGB используется информация красного (Red), зеленого (Green), синего (Blue) каналов с различными комбинациями. В модели Lab (CIE LAB) канал L отвечает за светлоту, а каналы a и b за цветовой тон.

Используя информацию в различных цветовых каналах, можно получить изображение объектов интереса одинаковой формы, но представленные в различном цветовом решении, которые будут сильно отличаться друг от друга, что даёт возможность распознать объекты с субпиксельными размерами. Так как представление одного цветового канала – полутоновое, при реализации распознавания цветных изображений в оптико-цифровых дифракционных корреляторах [1] каждый канал можно выразить независимо, что сильно повысит быстродействие работы модулятора, а за счет того, что длины волн не мешают друг другу, они могут обрабатывать различную информацию об объекте. Такие системы могут базироваться на доступных средствах модуляции света, например на микрозеркальных модуляторах света, которые обеспечивают высокие скорости ввода и обработки изображений и дают высокий уровень распознавания. Примеры результатов моделирования представлены на рис. 1 и 2.

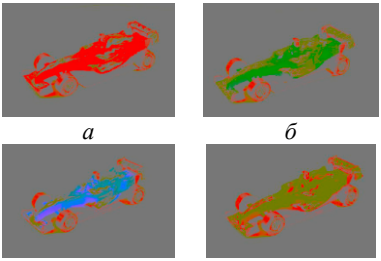


Рис. 1. Объекты интереса в канале «a+b» в модели Lab (объекты одинаковой формы, но разной окраски)

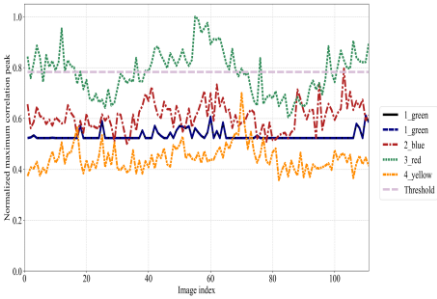


Рис. 2. Дискриминационная характеристика (зависимость высоты корреляционного пика от угла поворота объекта) для канала b в модели Lab, распознаётся объект 64*64 пикс с определённой окраской

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-07-00829.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.

2. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study // Optical Engineering. 2008. V. 47(6).

3. Camposa J., Moreno I., Nicolasc J., Yzuela M.J. Uses of spatial light modulators for colour optical processing // Proc. SPIE. 2013. V. 8833. P. 88330A.

4. Kober V., Lashin V., Moreno L, Campos J., Yaroslavsky L.P., Yzue M.J. Color component transformations for optical pattern recognition // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V. 14. No. l0.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Аблизен Р.С. 505
Авдеева А.Ю. 91
Авдонкина Н.А. 262
Аверин С.В. 221, 425
Авершин А.А. 217
Авласевич Н.Т. 627, 655
Агафонов В.М. 85
Агафонова П.Л. 421
Агишев И.Н. 302
Айкашева О.С. 465
Аймуханов А.К. 561, 563
Акимов А.А. 177
Акмалов А.Э. 137, 193
Аксенов Е.А. 137
Александрова А.И. 133, 583
Алексеев Е.Е. 481
Алексеев К.Н. 338, 342
Алексеев Н.И. 457
Алиев С.А. 411
Алиева С.С. 338
Алимбеков И.Р. 447
Алихайдарова Э.Ж. 386
Алоян Г.А. 85, 326
Алымкулов С.А. 260
Аманова М.А. 55, 298
Амброзевич С.А. 65, 97, 99
Ананьев В.А. 127
Ананьин О.Б. 503
Андреев Ю.М. 53
Андреева Я.М. 396
Аникеева В.Е. 95
Аникьев А.А. 280, 320
Аникьева Э.Н. 280, 320
Анисимова Н.И. 427
Антонов А.И. 639
Антонов Е.А. 401, 415, 529
Ануфрик С.С. 659
Аракелян С.М. 388
Арапов Ю.Д. 185, 581
Артамонов Д.А. 117
Архипов А.В. 647
Асеев В.А. 127, 374
Астафуров Р.А. 272
Асташкевич С.А. 467, 477, 487
Афанасьев А.Е. 195
Афанасьев Д.А. 386, 403
Ахатова Ж.Ж. 561
Ахматханов А.Р. 37, 151
Ашмарин А.А. 609

-Б-

Бабкин О.Э. 465
Бабкина А.Н. 372, 376
Бабкина Л.А. 465
Баззал Х. 489
Байрамдурдыев Д.Я. 175
Бакланова К.Д. 87
Бакунов М.И. 41, 49, 51, 119
Балакирева И.В. 211
Балан Н.Н. 237, 575
Балбекин Н.С. 235
Балдуева И.А. 262
Балыкин В.И. 195
Баранов А.Ю. 463
Баранов М.А. 545
Баршак Е.В. 342
Барышникова С.Ю. 459
Белашов А.В. 262, 665, 671
Белоусова И.М. 555
Беляева Т.Н. 665
Бердоносов П.С. 312
Бетин А.Ю. 641
Бикбаев Р.Г. 409, 433, 435, 437
Билык В.Р. 449, 451
Бланк А.В. 147, 233, 603
Блинов И.Ю. 211
Бобровский А.Ю. 316
Богачев В.Ю. 183
Богачков И.В. 133, 579, 583, 585
Богданов С.Д. 147, 603
Богданова Е.В. 346
Бодренин В.Е. 268
Бодров С.Б. 41, 161
Бойд Р. 31
Бойко А.А. 151

Бойко Н.И. 316
Бойченко А.П. 61, 380, 417
Болдырев К.Н. 57, 95, 292, 300
Больбасова Л.А. 215
Бондаренко В.И. 103
Борисов В.Н. 645, 649
Боритко С.В. 223
Боритко Я.С.223
Бормашов В.С. 209
Боровых С.В. 487
Бородин Ю.П. 245
Бородина Л.Н. 645
Брославец Ю.Ю. 203
Брюханов В.В. 63, 117
Бугай А.Н. 595
Будаговский И.А. 316
Бузников А.А. 607
Булыга Д.В. 187
Булычев Р.П. 605
Бурмак Л.И. 667
Бурова Е.А. 161
Буряков А.М. 441, 455
Бусурин В.И. 605, 613
Буть А.И. 659
Буфетов И.А. 69
Бухарина А.Б. 505
Бухаров Д.Н. 388
Быковский А.Ю. 225

-В-

Вайсбург Н.Я. 304
Вакула Н.В. 453
Ванин А.И. 573
Варламов П.В. 396
Вартапетов С.К. 537
Васильев А.Л. 103
Васина М.В. 455
Васютинский О.С. 262, 665
Векшин М.М. 352
Величко Е.Н. 635
Вельмискин В.В. 103
Вениаминов А.В. 545, 645
Вершицкий В.И. 330
Ветров С.Я. 91, 433, 435, 437
Викулин Д.В. 342
Виноградова П.В. 565
Витухновский А.Г. 97
Во Ш.Х. 613
Вовченко Е.Д. 495
Возианова А.В. 549, 617
Войцеховский А.В. 413, 423, 503
Волков В.Г. 357, 360
Волков В.С. 163
Волков Г.В. 411
Волова Л.Т. 513, 515, 523
Вольф И.Э. 250, 669
Воронцова И.О. 31
Воропаев К.О. 145
Воропай Е.С. 489
Воскресенский В.М. 288

-Г-

Гавриш С.В. 501
Газизов А.Р. 431
Галуцкий В.В. 272, 286
Ганжерли Н.М. 647
Ганин Д.В. 537, 539
Гансовский В.В. 362
Гаппарова М.Н. 268, 278
Гельфонд М.Л. 262
Гендрина А.А. 332
Георгиева А.О. 671
Герасименко А.В. 525
Герасимов В.С. 409
Гиндин П.Д. 357, 360
Гожальский Д.И. 545
Голодухина С.В. 73
Гончаров Д.С. 675, 683, 685, 693
Горбатова А.В. 441, 455
Горбенко Д.А. 262
Горелик В.С. 322
Городецкий А.А. 235, 254
Горяев М.А. 427
Горяинов В.С. 607
Гошев А.А. 593
Грачёв Н.А. 346
Григорьева А.Н. 359
Грицута А.Н. 215
Гришунин К.А. 449, 451
Грищенко И.В. 314
Грудцын Я.В. 71
Губайдуллина К.В. 549
Губарев А.П. 661
Губин М.Ю. 163
Гудкова Ю.А. 625
Гузаиров С.А. 177
Гуляев С.Н. 647
Гурина А.М. 511

Гуров И.П. 629
Гусейн-Заде Н.Г. 491
Гуценко Д.Д. 292
Гущин С.В. 296, 354

-Д-

Давыдов В.Н. 384, 405
Даденков И.Г. 153, 302
Данг В.Х. 613
Данилов В.А. 167
Данилов О.Б. 555
Данилов П.А. 290
Данилова А.Б. 262
Дворецкий С.А. 413
Девицкий О.В. 392, 394
Дегтяренко К.М. 423
Демидов В.В. 127
Демина Т.С. 141
Демченко П.С. 557
Денисов Д.Г. 243
Державец Л.А. 507
Дёмин А.В. 209
Джаманкызов Н.К. 260, 657
Джанабекова Р.Х. 398
Джафаров А.В. 623
Дзедолик И.В. 165
Дзядух С.М. 413, 423
Добдин С.Ю. 623
Долганов В.К. 87
Долганов П.В. 87
Долгушкин Д.А. 513
Долгушов Г.Г. 521, 523
Долин А.А. 533
Доманина И.В. 495,
Дроздовский А.В. 129
Дружин В.В. 245
Дубиков А.В. 37
Дубовик А.Ю. 545, 553
Дубровин В.Д. 370, 378
Дубынин С.Е. 245
Дудова Д.С. 539
Дулясова А.А. 141
Дунаева Е.Э. 290
Дьяченко В.В. 535

-Е-

Евстропьев С.К. 127
Евтихиев Н.Н. 673, 675, 681, 689
Егоров А.Н. 577
Егорова Я.Б. 372
Егорышева А.В. 73
Елютин С.О. 157
Епифанов Е.О. 75, 79, 407
Ермаков А.С. 296, 354
Ермаков Л.К. 479
Ершов А.Е. 409
Есеев М.К. 593
Есин А.А. 37, 151
Ефимова К.В. 258
Ефимова У.А. 415
Ефремова Е.А. 171
Ефремцев В.Г. 362
Ефремцев Н.Г. 362

-Ж-

Жанг С.-Ч. 31
Жбанова В.Л. 601
Жевайкин К.Е. 89
Жевлаков А.П. 555
Жеглов М.А. 605
Жердев А.Ю. 239, 641
Жигарьков В.С. 189, 543, 559
Житов В.А. 425
Жихорева А.А. 262, 665
Жлуктова И.В. 491
Жукова М.О. 31, 350
Жумабеков А.Ж. 569
Жумаева И.О. 145
Жумалиев К.М. 260, 657
Журин Т.А. 47

-З-

Заболотский М.С. 97
Завгородний А.В. 561, 563
Задорожный О.Ф. 384, 405
Зажогин А.П. 489, 507, 509, 511
Заколдаев Р.А. 541
Запонов А.Э. 551
Зарецкая Г.А. 129
Зарипов М.Р. 459, 529
Зарубин В.П. 189, 219
Захаров Л.Ю. 425
Захаров С.М. 637
Зачиняев Ю.В. 625
Зейниденов А.К. 563
Земцов Д.С. 619
Злоказов Е.Ю. 675
Золотовский И.О. 344, 348

Золотько А.С. 216
Зотов А.М. 213
Зубавичюс Р.В. 421
Зыбин М.А. 521, 523
Зыкова Л.А. 667
Зырянова К.С. 372, 376
Зюбин А.Ю. 81, 439

-И-

Ибраев Н.Х. 398, 403, 429, 567
Иванов В.В. 237, 575
Иванов Г.Ю. 67
Иванов П.А. 264
Иванов С.А. 641
Иванова А.И. 43, 191, 294, 499
Ивахник В.В. 177, 179
Ивашко С.С. 272
Ивлиев М.А. 521
Идрисов Р.Ф. 589
Ильина В.В. 465
Ильясов Б.Р. 563
Иову М.С. 643
Ионин А.А. 71, 83, 197, 290, 527
Ионов А.С. 145
Исмагилов А.О. 332, 336
Исмаилов Ш.М. 185
Исманов Ю.Х. 260, 615, 657
Исхакова Л.Д. 103
Итина Т.Е. 396

-К-

Казанцев С.Ю. 481, 485, 491
Казанцева Е.В. 173
Кайтуков Ч.Б. 247
Калиникос Б.А. 205
Калинников Д.С. 81
Калугин А.И. 401, 415, 457, 459, 529
Каменев В.Г. 185
Каменев О.Т. 587
Камынин В.А. 199, 491
Каперизк К.А. 183
Каплунов И.А. 43, 191, 294, 304, 499
Каранкевич О.А. 278
Каргин Ю.Ф. 302
Карпиков Б.Н. 459
Карпов В.Б. 310
Карпов В.В. 357, 360
Карпова Т.К. 326
Карчевски Г. 111
Кастро Р.А. 427, 445
Касьянов И.В. 392
Кацаба А.В. 97
Ким М.С. 569
Киняевский И.О. 83, 197, 290, 527
Киреева Н.М. 565
Кирпиченко Д.А. 368
Киселев В.А. 247
Киселев В.В. 485
Кистенева М.Г. 47, 302
Кишкин С.А. 258
Клевцов О.В. 380, 417
Климачев Ю.М. 83, 197, 527
Климин С.А. 101, 306, 312
Князьков А.В. 318
Ковалев М.С. 239
Коваленко Н.В. 85, 326
Кожевников В.А. 483, 497
Козлов А.В. 252
Козлов А.Ю. 83, 197
Козлов С.А. 31, 332
Козловский К.И. 137
Козюхин С.А. 390
Колесниченко А.А. 533
Колкер Д.Б. 151
Колмычек И.А. 115, 159
Колобов А.В. 427
Колокольников И.Н. 635
Колчин А.В. 390
Колядин А.В. 187
Колядин А.Н. 69
Комарецкий В.В. 495
Комарова О.С. 531
Комисарчук Н.А. 579, 585
Комоцкий В.А. 241
Кон И.И. 439
Кондрашов А.А. 533
Кондрашов А.В. 205
Конеев Р.В. 475
Кононов А.А. 427
Конради Д.С. 551
Константинова Е.И. 63
Коншина Е.А. 382
Коняшкин А.В. 85, 314
Копёнкин С.С. 245
Копылов Д.А. 324
Копылова Т.Н. 423
Копьев П.С. 531
Копьева М.А. 105, 199

Коренский М.Ю. 537
Корибут А.В. 71
Коркишко Ю.Н. 270
Коркунова О.С. 539
Корнилова Е.С. 665
Коробко Д.А. 344
Коробков В.В. 613
Коробков К.А. 605
Королева А.В. 125
Короленко П.В. 213, 231
Корытин А.И. 161
Косарева О.Г. 71
Косолапов А.Ф. 69
Костарев В.А. 193
Кострицкий С.М. 270
Котков А.А. 83, 197
КотковскиЙ Г.Е. 137, 193
Котликов Е.Н. 571
Котов В.М. 221, 425
Котова С.П. 258
Кочурова Д.Н. 457
Кравец К.Ю. 505
Красников И.В. 517
Краснов В.В. 256, 673, 681, 691
Кривобок В.С. 308
Кривошеев И.А. 266
Криштоп В.В. 266, 565
Круминьш Э.К. 547
Крылов И.Р. 171
Крючков Д.С. 527
Куанышбеков М.Е. 386
Кубасов П.В. 581
Кудаев О.С. 366
Кудрявцев А.А. 467
Кудрявцева А.Д. 107
Кудряшов С.И. 290
Кузнецов А.А. 216
Кузнецов А.С. 661
Кузнецов И.В. 551
Кузнецов Л.Г. 400
Кузнецов П.И. 425
Кузнецов С.А.135
Кузнецов С.А. 357, 360
Кузнецов С.В. 354
Кузнецова Е.С. 312
Кузовков А.В. 237, 575
Кузьменко Н.К. 127, 374
Кузьмин А.М. 328
Кузьмин Д.В. 641
Кузьмин И.Д. 673
Кузьмин М.С. 677
Кулаков М.Н. 679
Куликова Е.Н. 629
Кульпина Е.В. 376
Куля М.С. 235, 254
Курбатова Е.А. 687
Курников М.А. 49, 51
Кусков И.Э. 250, 669
Кучеренко И.В. 111
Кучеренко М.Г. 139, 443, 447, 473
Кучерик А.О. 388

-Л-

Лавровская Н.П. 571
Лазарев В.А. 513
Лазаренко П.И. 390
Лампин Ж.-Ф. 197
Ланский Г.В. 53
Лапин Б.П. 342
Лапин В.А. 334, 348
Лапшин К.Э. 537
Ларионов И.А. 67
Лебедев В.В. 205
Лебедев В.Ф. 187
Лексин А.Ю. 163
Лентовский В.В. 531
Лесничий В.В. 649
Ливашвили А.И. 565
Лисенкова А.Е. 461
Лицзин Ч. 541
Логачева Е.И. 77
Логинов В.В. 501
Ломкина А.В. 513
Лукин В.П. 215
Лушников Д.С. 239
Львова К.И. 245
Ляликов А.М. 627, 655, 659
Ляпин А.А. 296, 328, 354
Лятун И.И. 421
Ляшко Е.И. 157

-М-

Маврицкий О.Б. 577
Мавричев А.С. 507
Магницкий С.А. 209
Майдыковский А.И. 159
Маймистов А.И. 157
Макаревич А.В. 55, 298

Макаров Д.Н. 593
Макин В.С. 77, 121, 419
Макин Р.С. 77, 419
Максименко В.А. 35
Максимов Е.М. 137
Маликов Р.Ф. 175
Малинина П.И. 245,
Малинский Т.В. 191,499
Малышев В.А. 175
Малышева И.В. 115
Мамонов Е.А. 324
Мамрашев А.А. 53, 135
Мандур М.М. 467
Манжула И.С. 565
Манцевич С.Н. 219
Маркин В.В. 641
Маркова М.Д. 513
Мартынова А.А. 511
Мартышов М.Н. 125
Марченко В.М. 485
Маслов А.В. 119
Маслова Г.Т. 507
Масюков М.С. 549
Матросова А.С. 127
Матюшкина А.А. 553
Маурер И.А. 647
Машинский В.М. 103
Машко А.М. 195
Мегедь М.С. 557
Мейстерсон А.А. 195
Мелехов А.П. 495, 503
Мельник М.В. 31, 340
Меньшова Е.П. 398
Метлин М.Т. 65, 89
Метлина Д.А. 65
Мешалкин А.В. 241
Мещерова Д.Н. 207
Миколуцкий С.И. 191, 499
Миксюк Ю.И. 153
Миликов Э.А. 203
Милович Ф.О. 103
Минаев В.П. 183
Минаев Н.В. 75, 79, 141, 181, 183, 407, 539, 543, 547, 559
Минаева Е.Д. 141, 181
Минаева С.А. 181, 547
Минаков Ф.А. 135
Миронов А.В. 547
Миронов П.П. 334, 344
Миронова О.А. 547
Миськевич А.И. 59
Митин Д.Б. 609
Митюрева А.А. 471, 487
Митягин Ю.А. 71, 137, 197
Михайлов Н.Н. 413
Михеев Г.М. 123
Мишина Е.Д. 441
Мишина И.В. 621
Могильный В.В. 597, 651
Можаев Р.К. 599
Мокроусова Д.В. 71
Молодцов Д.Ю. 673
Молчанов В.Я. 45, 219
Молчанов С.В. 294
Молчанова А.Д. 300
Морозов А.В. 245
Москаленко А.С. 463
Муратов А.В. 111
Мурзина Т.В. 93, 159, 169, 324
Муханьков Д.М. 85, 326
Мыслицкая Н.А. 421

-Н-

Навныко В.Н. 55, 298
Надолинский А.М. 475
Налбандян В.М. 473
Налбантов Н.Н. 286
Насонов А.А. 233
Настас А.М. 643
Небавский В.А. 619
Некрасов А.Д. 143, 308
Несмелов С.Н. 413, 423
Нехаева Т.Л. 262
Нечипуренко Н.И. 509
Неясов П.П. 447
Никитин А.А. 205
Никитин В.А. 61, 352
Никифоров С.М. 505
Николаев Н.А. 53, 135
Николаев Н.Э. 105, 131
Никоноров Н.В. 127, 370, 641
Никулин Д.А. 392, 394
Новиков В.Б. 93, 169
Новикова Н.Н. 101, 111
Новикова Ю.А. 571
Новоковская А.Л. 49
Нурыев Р.К. 376

-О-
Овеченко Д.С. 61, 380
Овчаренко С.В. 449, 451
Одиноков С.Б. 239, 641, 661
Окунев Д.В. 2740
Окунь Р.А. 649
Олейничук Е.А. 559
Омарова Г.С. 567
Оникиенко Е.В. 519
Опарин Е.Н. 350
Орехова Н.А. 511
Орешкина К.В. 370
Орлова А.О. 553
Останин А.А. 541

-П-
Павельев В.С. 151
Павлов А.В. 227
Павлов П.В. 250, 669
Павлов С.В. 131
Павлюк А.С. 649
Палатников М.Н. 39, 276, 282, 284, 288
Панов Н.А. 71
Панькова С.В. 573
Паренаго О.П. 79
Парпулова К.В. 340
Парфенов В.А. 356, 359
Патапович М.П. 489, 509
Пахлавонова К.Д. 411
Пахомов О.В. 463
Пашковская И.Д. 509
Пен Е.Ф. 653
Пенто А.В. 505
Пеньков С.А. 447
Перевозникова А.С. 245
Перевощиков Д.А. 401
Перескоков В.С. 165
Перин А.С. 268, 274, 278
Песняков В.В. 617
Песчанский А.В. 101
Петров А.Н. 205
Петров Н.В. 235, 254, 671
Петров Н.И. 167, 591
Петров Ю.С. 587
Петрова Е.К. 693
Петухова А.Ю. 346
Печенкин А.А. 577, 599
Пикулев В.Б. 39
Пикуль О.Ю. 284
Писарева Е.В. 515
Пластинин Е.А. 103
Плеханов А.А. 137
Плешанов И.М. 461
Подкопаев А.В. 59
Подлесных А.А. 587
Подлесных С.В. 491
Подсвиров О.А. 364, 368
Полетаев Д.А. 611
Понетаева И.Г. 286
Пономарев Д.С. 441
Пономарев Н.М. 675, 683, 685, 693
Пономарева Е.А. 332, 336
Попов А.А. 525
Попов В.В. 167
Попов В.К. 547
Попова А.В. 266
Попова И.О. 445, 555
Попова М.Н. 57, 306
Преснов Д.Е. 390
Пресняков М.Ю. 102
Привалов В.Е. 483, 497, 535
Пройдакова В.Ю. 354
Прокопенко Т.А. 509
Прокопова Д.В. 258
Проскурин С.Г. 631, 633
Просовский Ю.О. 243
Прохоров А.В. 163
Прохорова У.В. 171
Пугачев Д.Ю. 501
Путилин А.Н. 245
Путилин С.Э. 31, 332, 336
Пучнина С.В. 501
Пятнов М.В. 91
Пятышев А.Ю. 322

-Р-
Равин А.Р. 411
Радионов М.С. 101
Рамакоти Р.Ш. 495, 503
Распутный А.В. 324
Резвых А.Д. 557
Резник И.А. 545, 553
Ризаев Г.Э. 71
Рогалин В.Е. 191, 491, 499
Рогов С.А. 677
Рогожников Г.С. 621
Родин В.Г. 681, 687
Родин Д.А. 362

Романенко Д.К. 268, 278
Романов В.В. 621
Ромашкина А.М. 93
Ромашко Р.В. 29
Рот Б. 517
Рудакова Н.В. 91
Ружицкая Д.Д. 231
Русинов А.П. 139
Рыбаков М.А. 533
Рыбалтовский А.О. 79, 407
Рыбась А.Ф. 519
Рыжиков С.Б. 231
Рыжикова Ю.В.231
Рыжов И.В. 175
Рымкевич В.С. 493
Рымов Д.А. 689
Рябочкина П.А. 73, 296, 354
Рябушкин О.А. 85, 314, 326
Рябцев И.П. 256

-С-

Савельев М.В. 179
Савинов С.А. 71, 197
Савич Д.Е. 266
Савченко Е.А. 635
Савченков Д.В. 577
Савченков Е.Н. 37
Сагитова А.М. 83, 197, 527
Садыкова А.Е. 569
Саечников К.А. 153,
Сазонов С.В. 155
Салахов М.Х. 431
СалганскиЙ М.Ю. 344
Салецкий А.М. 310
Салова А.В. 665
Самагин С.А. 258
Самвелов А.В. 463
Самусев И.Г. 81, 117, 439
Санина В.А. 366
Сапарина С.В. 109
Саушин А.С. 123
Сахаров М.В. 551
Свяховский С.Е. 400
Сгибнев Е.М. 370
Селезнев Б.И.145
Селезнев Л.В. 71, 290
Селиверстова Е.В. 429, 567, 569
Семашко В.В. 296
Семенов В.Г. 203
Семенова И.В. 262, 665
Семенова Л.Е. 469
Семенцов Д.И. 348
Семёнова О.И. 95
Сергеев М.М. 396, 493
Сергеев Ю.А. 161
Сетейкин А.Ю. 517
Сивак А.И.
Сидоров А.И. 364, 366, 368, 453, 461
Сидоров А.И. 505
Сидоров Г.Ю. 413
Сидоров Н.В. 39, 276, 282, 284, 288
Сим Е.С. 47
Синицын Д.В. 83, 197
Ситников Н.Н. 609
Скрипаль А.В. 623
Слежкин В.А. 63, 117
Смаев М.П. 316
Смирнов А.В. 326
Смирнов В.В. 471, 487
Смирнов М.В. 39
Смирнов Н.А. 290
Смирнов С.В. 37
Смирнова Л.М. 445
Соколенко Б.В. 235, 611, 663
Сокольников А.В. 278
Соловьев В.Г. 573
Соснова Н.С. 356
Средин В.Г. 503, 551
Станкевич А.И. 597, 651
Стариков Р.С. 33, 619, 673, 675, 679, 683, 685, 689, 693
Стародуб О.Р. 288
Сташкевич И.В. 643
Степанов А.Н. 161
Степанов А.Р. 250
Стирманов Ю.С. 314
Столов А.А. 109
Строганова Е.В. 286
Строкова Ю.А. 310
Стяпшин В.М. 123
Субатович А.Н. 515
Суетин Н.В. 241
Сулеймен Е. 57
Султангулова А.И. 533
Сухорукова О.Б. 475
Сушко Д.Н. 346
Сысоев И.А. 394
Сячина М.А. 547

-Т-
Тавлеев А.А. 581
Тайдаков И.В. 65, 99
Тананаев П.Н. 99
Таныгина Д.С. 135
Темирбаева Д.А. 429
Теплякова Н.А. 276, 282, 284
Тетерин Е.П. 362
Тетерин П.Е. 362
Тимофеев И.В. 91, 433, 435, 437
Тимченко Е.В. 513, 515, 521, 523
Тимченко П.Е. 513, 515, 521, 523
Титов Р.А. 282
Титова А.В. 507
Толстик А.Л. 153, 302, 643
Третьяков С.А. 43, 294, 304
Трикшев А.И. 491
Троценко Н.А. 675, 683, 685
Трубаев В.В. 121, 419
Трубецкая А.С. 507
Туйцына А.А. 559
Туров А.Т. 254
Тынышова Т.Д. 615
Тыртышный В.А. 67

-У-
Уколов Д.С. 599
Уманская С.Ф. 107
Умаров М.Ф. 280, 320
Унтура М.М. 143, 308
Ус Н.А. 217
Усиевич Б.А. 167
Устинов А.Б. 205

-Ф-
Фазлиев Т.Ш. 619, 675, 685
Федоров В.А. 270
Федоров Д.Л. 531
Федоров Д.О. 537
Федоров П.П. 354
Федорова Я.В. 515
Федянин В.В. 99
Фёдоров Ю.К. 374
Филатова С.А. 199, 491
Фишман А.И. 109
Фокина М.И. 89
Фомичев А.А. 203
Фотиади А.Э. 497
Фролов О.О. 515, 521, 523
Фролов С.В. 631
Фроловцев Д.Н. 209

-Х-
Хабибуллина И.А. 609
Хавлюк П.Д. 382
Халяпин В.А. 595
Ханкаев А.А. 117
Ханевич П.А. 641
Харинцев С.С. 109, 113, 431
Харченко Е.Л. 237, 575
Хатырев Н.П. 211
Хафизов И.Ж. 619
Хобта Р.Г. 669
Ходзицкий М.К. 549, 557
Ходл С.М. 547
Холина М.С. 577
Хомич Ю.В. 191, 499
Хомченко А.В. 201
Хопёрский А.Н. 475
Храмцов Э.А. 651
Хрущалина С.А. 73
Хусяинов Д.И. 441, 455

-Ц-
Цветков А.В. 573
Цветков В.Б. 199, 491
Цепич В.П. 461
Цибульникова А.В. 117, 421
Цицилашвили Г.И. 213
Цыпкин А.Н. 31, 332, 336, 340, 350

-Ч-
Чеботарев И.А. 197
Чеплагин Н.А. 129
Черевков С.А. 545
Черешнев В.О. 631, 633
Черёмхин П.А. 252, 679, 687, 689
Чернега Н.В. 107
Чернов М.В. 328, 354
Черный-Ткач К.Б. 521
Черных Е.А. 113
Черняк М.Е. 599
Черпак П.С. 67
Чехлова Т.К. 105, 131, 199, 411
Чижиков А.И. 45
Чирков Н.А. 599
Чистяков А.А. 137, 193

Чмерева Т.М. 443
Чу М. 306
Чувакова М.А. 151

-Ш-
Шабанов В.Ф. 437
Шавельев А.А. 296
Шавкута Б.С. 539
Шаганов И.И. 555
Шадрин Е.Б. 445
Шадрин Н.М. 529
Шайтанов Д.В. 380, 417
Шалыгин А.Н. 661
Шамрай А.В. 205
Шандаров С.М. 37, 47, 298, 302
Шаповалов А.В. 272
Швецов С.А. 316
Шевченко М.А. 107
Шеляков А.В. 609
Шеманин В.Г. 535
Шепелевич В.В. 55, 298
Шестериков А.В. 163
Шестопалова Ю.А. 378
Шибаев В.П. 316
Шилова И.В. 201
Шипило Д.Е. 71
Шипко В.В. 229
Широкова А.В. 119
Широкова А.С. 89
Шифрина А.В. 691
Шишова М.В. 239, 641
Шмагина Е.Г. 382
Шнуров А.С. 362
Шнырев С.Л. 533
Шостка В.И. 330, 663
Шостка Н.В. 330, 611, 663
Шрайэк Ш. 111
Штек С.Г. 605
Штоколов А.А. 625
Шубный А.Г. 75, 79
Шугуров А.И. 41
Шулейко Д.В. 390
Шульга А.В. 201
Шундалов М.Б. 511
Шур В.Я. 37, 151

-Щ-
Щеглова Н.Л. 359
Щербакова В.А. 346
Щербина А.Д. 661
Щербинин Д.П. 382
Щукарев И.А. 334, 344
Щукин А.В. 268

-Э-
Эрькин И.Ю. 675

-Ю-
Юрина У.В. 364
Юрлов И.А. 73
Юрчак В.А. 503
Юсупов В.И. 183, 189, 543, 559
Юшков К.Б. 45, 219

-Я-
Яворский М.А. 342
Яковенко Н.А. 352, 417
Яковлев В.А. 101, 111
Якушенков П.О. 149
Ямщиков В.А. 191, 499
Яников М.В. 573
Яновский А.В. 247
Ярощук П.Н. 581
Ясев С.Г. 463
Яценко А.В. 270