МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ» НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06) ББК 72г Н 34

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015.-392 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 28–30 января 2015 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, прикладная оптика.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 18 ноября 2014 года. Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2053-6

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015

Подписано в печать 20.11.2014. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 24,5. Тираж 220 экз. Заказ № 193.

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»

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

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

Козлов С.А. – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

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

Лавров А.П. – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Малов А.Н. – Иркутский государственный медицинский университет

Маныкин Э.А. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

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

Проклов В.В. – Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

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

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

Фетисов Ю.К. – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

Фёдоров И.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Петровский А.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Ученый секретарь:

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

Адреса и телефоны для контактов

115409, Москва, Каширское шоссе, 31, НИЯУ МИФИ, ком. Э-005.

Телефон: (499) 324-74-03. Факс: (499) 324-74-03.

E-mail: holo@pico.mephi.ru, holo_mephi@mail.ru.

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИРЮКОВ А.С., БУФЕТОВ И.А.
Волоконные световоды с полой сердцевиной: от фотонно-кристаллических
до световодов с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка18
ПРОКЛОВ В.В.
Эффекты многочастотной акустооптической брэгговской дифракции
с малыми интермодуляционными искажениями
МОРАРЕНКО В.В.
Современные методы и решения компании Keysight Technologies
для анализа оптических компонентов волоконно-оптических линий связи22
КУЗЯКОВ Б.А., МОРАРЕНКО В.В., ШМЕЛЕВ В.А.
Современные методы реализации и селекции орбитальных угловых
моментов фотонов в оптических комбинированных линиях связи24
ЕЛЕЗОВ М.С., ОЖЕГОВ Р.В., КУРОЧКИН Ю.В., КОВАЛЮК В.В.,
ВАХТОМИН Ю.Б., ГОЛЬЦМАН Г.Н.
Передача квантовых состояний фотонов на расстояние свыше 300 километров
с использованием сверхпроводниковых однофотонных детекторов26
ЗВЕГИНЦЕВ В.Н., ИВАНОВ С.И., ЛАВРОВ А.П., САЕНКО И.И.
Характеристики аналоговых волоконно-оптических линий передачи
сверхширокополосных радиосигналов
ЦАРУК А.А., ВЫТНОВ А.В., ИВАНОВ Д.В.
Методы передачи высокостабильных опорных сигналов по оптоволоконной
линии для синхронизации радиоастрономической аппаратуры30
ДОДУХОВА И.А., БЫЛИНА М.С.
Сопоставление результатов моделирования оптического усилителя EDFA
с результатами других исследователей
БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО О.А., ПРОКЛОВ В.В., ФИЛАТОВ А.Л.
Использование многополосных акустооптических фильтров
для генерации спектрально-кодированных сигналов в некогерентных
системах оптической связи
ХОРКИН В.С., ВОЛОШИНОВ В.Б., КУЛАКОВА Л.А., КНЯЗЕВ Г.А.
Акустооптические характеристики стекол на основе теллура
ЕРМАКОВ А.А., БАЛАКШИЙ В.И.
Лучевые спектры акустических пучков в кристалле теллура
МОЛЧАНОВ В.Я., ЧИЖИКОВ С.И., ЮШКОВ К.Б.
Формирование профиля лазерных пучков методами акустооптики
Микровидеоспектрометр-профилометр на основе акустооптической фильтрации44
фильтрации
Пространственная структура акустооптического взаимодействия
пространственная структура акустооптического взаимодеиствия в двуосном кристалле йодноватой кислоты46
в двуссном кристалле иодноватои кислоты40

МАНЫКИН Э.А., МЕЛЬНИЧЕНКО Е.В.	
Анализ свойств редкоземельных элементов для применения	
в квантовом процессинге	48
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И., ТРОФИМОВА А.В.,	
МУРАВСКИЙ Ал.Ан., МУРАВСКИЙ Ан.Ал.	
Фоточувствительные полимеры для ориентации ЖК материалов	50
СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.	
Нелинейно-оптические кристаллы ниобата лития с низким эффектом	
фоторефракции: синтез, структура, свойства	52
СТРОГАНОВА Е.В., СУДАРИКОВ К.В., РАСЕЙКИН Д.А., ГАЛУЦКИЙ В.В.	
Исследование фоторефракции градиентных кристаллов LiNBO ₃	
на длине волны 1053 нм	54
ДЮ В.Г., ХУДЯКОВА Е.С., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М.,	
КАРГИН Ю.Ф.	
Спектральные зависимости примесного оптического поглощения	
в кристаллах силленитов	56
АНЦЫГИН В.Д., МАМРАШЕВ А.А., НИКОЛАЕВ Н.А., ПОТАТУРКИН О.И.	
Анизотропия терагерцовых оптических свойств и особенности	
структуры кристаллов КТР	58
ЧУМАНОВ М.В., ПАРГАЧЁВ И.А., СЕРЕБРЕННИКОВ Л.Я.,	
КРАКОВСКИЙ В.А., ТАГИЛЬЦЕВА М.А., КРЫМЦЕВА К.О.	
Устройства управления и преобразования лазерного излучения	
	60
ОСИПОВ Е.В., ДОВЖЕНКО Д.С., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Исследование оптических свойств полупроводниковых квантовых точек	
CdSe/ZnS/CdS/ZnS, внедренных в одномерный фотонный кристалл	
на основе пористого кремния	62
НАЛЕГАЕВ С.С., ХОРОШИХ Д.А., ЦЫПКИН А.Н.	
Исследование особенностей нелинейно-оптических характеристик	
стекол и коллоидных растворов с квантовыми точками	.64
АЛИЕВ С.А., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К.	
Исследование фоточувствительности пленок диоксида титана,	
изготовленных по гель-технологии	66
АДАМОВ Г.Е., ВЕРБИЦКИЙ Е.В., ГРЕБЕННИКОВ Е.П., ЗИНОВЬЕВ Е.В.,	
ПОРОШИН Н.О., РУСИНОВ Г.Л., ШМЕЛИН П.С.	
Усиление люминесценции флуорофора C ₃₃ H ₂₃ N ₃ O ₂ S в присутствии	
наночастиц серебра, как свидетельство формирования гибридной	-0
наноструктуры	58
МЕРЕЩЕНКО А.С., ОЛЬШИН П.К., СКРИПКИН М.Ю., ТВЕРЬЯНОВИЧ Ю.С.,	,
ТАРНОВСКИЙ А.Н.	
Фемтосекундная фотохимия хлоридных комплексов меди(II)	70
в ацетонитриле	70

КРИВЕНКОВ В.А., САМОХВАЛОВ П.С., СОЛОВЬЕВА Д.О., БИЛАН Р.С.,	
ЧИСТЯКОВ А.А., НАБИЕВ И.Р. Двухфотонно-возбуждаемый резонансный перенос энергии	
	72
в бионаногибридной структуре квантовые точки-бактериродопсин СЕМЁНОВ С.Л.	1 2
Микроструктурированные световоды в Научном центре волоконной	7.4
оптики РАН	/4
ДУРАЕВ В.П., МЕДВЕДЕВ С.В., КАСАТКИН Е.В.	7.
Отечественная элементная база для оптоэлектроники	/6
КОЛЯДИН А.Н., КОСОЛАПОВ А.Ф., ПРЯМИКОВ А.Д., БИРЮКОВ А.С.,	
АЛАГАШЕВ Г.К., БУФЕТОВ И.А.	
Дисперсия в полых микроструктурированных световодах	
с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка	78
ЕГОРОВА О.Н., СЕМЁНОВ С.Л., ВЕЛЬМИСКИН В.В., ЯЦЕНКО Ю.П.,	
СВЕРЧКОВ С.Е., ГАЛАГАН Б.И., ДЕНКЕР Б.И., ДИАНОВ Е.М.	
Световод с сердцевиной из фосфатного стекла, легированного	
ионами Er и Yb, и оболочкой из кварцевого стекла	80
БУХАРИН М.А., ХУДЯКОВ Д.В., ВАРТАПЕТОВ С.К.	
Прямая фемтосекундная запись световодов с депрессированной	
оболочкой в фосфатном стекле с неодимом	82
ВЕЛЬМИСКИН В.В., ЕГОРОВА О.Н., ЕРИН Д.Ю., СЕНАТОРОВ А.К.,	
ЧЕРНООК С.Г., СЕМЁНОВ С.Л.	
Усовершенствованный метод изготовления заготовок активных кварцевых	
волоконных световодов путем спекания порошков оксидов	84
БОРОДКИН А.А., ХУДЯКОВ Д.В., ВАРТАПЕТОВ С.К.	
Субнаносекундный мегагерцовый иттербиевый лазер полностью	
на волокне с поддержкой поляризации	86
МИРОННИКОВ Н.Г., ДЕРЕВЯНКО Д.И., КОРОЛЬКОВ В.П.,	
ШЕЛКОВНИКОВ В.В.	
Сканирующая лазерная запись на пленках гибридного фотополимерного	
материала на основе тиол-силоксан-акрилатных олигомеров	88
БОРОДАКО К.А., ШЕЙФЕР Д.В., ШЕЛЯКОВ А.В., СИТНИКОВ Н.Н.	
Влияние лазерной обработки на свойства эффекта памяти формы	
в сплаве TiNiCu	90
ПАВЛОВ С.В., РАВИН А.Р., ЧЕХЛОВА Т.К.	
Температурная корректировка характеристик планарных	
волноводных линз	92
БУРДУКОВА О.А., ПЕТУХОВ В.А., СЕМЕНОВ М.А.	
Лазерные красители для полупроводниковой накачки	94
ГАВРИЧЕВ В.Д., КАРАЧАРОВ Г.	
Спектральные и температурные характеристики растворов химических	
индикаторов	96
ВЕНЕДИКТОВ В.Ю., СОЛОВЬЕВ М.А.	
Голографические датчики волнового фронта	98
rr	

ЯКУШЕНКОВ Ю.Г. Обобщенная методология расчета и выбора основных параметров нипполайнен э Визуализация относительной фазы пульсации крови.......103 КУТАНОВ А.А., СНИМЩИКОВ И.А., НУРБЕК С.У. Прямая лазерная запись ДОЭ на пленках аморфного кремния......105 ГОНЧАРОВА П.С., КРИШТОП В.В., СЮЙ А.В., КИРЕЕВА Н.М., ПОНОМАРЧУК Ю.В., ЛИВАШВИЛИ А.И., КОРНЕЕНКО Т.Н. Управление спектральным составом излучения в системе ПОДОЛЯН Н.П., РОМАШКО Р.В., КУЛЬЧИН Ю.Н., НИППОЛАЙНЕН Э., КАМШИЛИН А.А. Исследование максимальной амплитуды пульсации крови методом АЛЕКСАНДРОВ С.Е., ГАВРИЛОВ Г.А., СОТНИКОВА Г.Ю. Пороговая чувствительность фотодиодных сенсоров среднего МАСАЛЬСКИЙ Н В Метод селективного детектирования веществ на основе волноводной КОЛЕСНИКОВ С.Ю., СКОРНЯКОВА Н.М. Использование трассеров различного типа в методе анемометрии БУСУРИН В.И., ТУАН Ф.А., АХЛАМОВ П.С. Характеристики и погрешности микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей на основе оптического БУСУРИН В.И., ЛВИН Н.Т., БЕРДЮГИН Н.А. Анализ погрешностей трехосевого преобразователя ускорений КУТУЗА И.Б., ПОЖАР В.Э. Применение акустооптических спектрометров в задачах диагностики алмазов. 122 ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., НАСТУЛЯВИЧУС А.А., ПЕЧЕНКИН А.А., СМИРНОВ Н.А., ЧУМАКОВ А.И. Возможности микроскопии ближнего ИК-диапазона для визуализации топологии микроэлектронных структур на основе кремния ВЕДЯШКИНА А.В., РИНКЕВИЧЮС Б.С. 3D-визуализация образования лазерных каустик в задачах лазерной

ДУДЕНКОВА В.В., ЗАХАРОВ Ю.Н.	
Теоретический расчет оптимальной мощности возбуждения	
для получения сверхвысокого разрешения с помощью ВаLM метода	.128
ГОРЮНОВ А.Е., ПАВЛОВ П.В., ПЕТРОВ Н.В., МАЛОВ А.Н.	
Использование вихревых пучков для оценки шероховатости поверхности	130
ОДИНОКОВ С.Б., ЖЕРДЕВ А.Ю., РУЧКИНА М.А.	
Исследование влияния геометрических параметров плазмонных	
дифракционных решёток на их спектрально-угловые характеристики	132
ПРОХОРОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ГЛАДУШ М.Г., ЛЕКСИН А.Ю.,	
АРАКЕЛЯН С.М.	
Генерация диссипативных лазерных пуль в плотных оптических средах	134
МАКАРОВ В.А., ПЕТНИКОВА В.М., РУДЕНКО К.В., ШУВАЛОВ В.В.	
Адиабатическое приближение для решения неинтегрируемой системы	
нелинейных уравнений Шредингера в нелинейной оптике	136
КАЗАНЦЕВА Е.В., МАЙМИСТОВ А.И.	
Эволюция уединенных волн в цепочке квантовых точек при учете	
обменного взаимодействия	138
РЫЖОВ И.В., ВОЛОШИН А.А., ВАСИЛЬЕВ Н.А., КОСОВА И.С.,	
МАЛЬІШЕВ В.А.	
Сверхизлучение Дикке: от регулярной нелинейной динамики к хаосу	141
БЫКОВ Н.В., МАЙМИСТОВ А.И.	
Коническая дифракция около границы раздела положительно	
и отрицательно преломляющих сред	143
КОЗЛОВ Д.А., КОТЛЯР В.В.	
Преодоление дифракционного предела при резонансной фокусировке	
лазерного света микроцилиндром	145
ИВАХНИК В.В., САВЕЛЬЕВ М.В.	
Четырехволновое взаимодействие в прозрачной среде с учетом	
электрострикции и эффекта Дюфура при больших коэффициентах	
отражения	.147
БУСАРОВ А.С., ВИНОГРАДОВ А.В., ПОПОВ Н.Л.	
Получение и перенос изображений наклонных объектов когерентными	
рентгеновскими пучками	149
КОРОЛЕНКО П.В., РЫЖИКОВА Ю.В.	
Свойства паттерных образований в оптических характеристиках	
1D фотонных кристаллов с метаматериалами	151
ЯКОВЛЕВА Т.В., КНЯЗЬКОВ А.В.	
Сопоставление двух методов определения электрооптического	
коэффициента среды	153
СЕМКИН А.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.	
Аналитическая модель дифракции света на поляризационных	1.55
голографических дифракционных ФПМ-ЖК-структурах	155

ВАСИЛЬЕВ И.В., ЛОМАНОВ А.Н.	
Математическая модель многопроходной модуляции с применением	
пространственных модуляторов света с отражающей ячейкой	157
ЖУМАЛИЕВ К.М., ТАЛЫПОВ К.К., АККОЗОВ А.Д.	
О синтезе голографических операционных фильтров для обработки	
аэрокосмических изображений	159
БЕХТИН Ю.С., ГУРЬЕВА М.Н.	
Беспороговое вейвлет-комплексирование ИК-изображений	
с геометрическим шумом	161
ИВАНОВ П.А.	
Распознавание изображений, подвергнутых изменению масштаба,	
с помощью инвариантных корреляционных фильтров	163
КОНСТАНТИНОВ М.В., СТАРИКОВ Р.С., ШАУЛЬСКИЙ Д.В.	
Применение векторных моделей трёхмерных объектов для представления	
эталонной информации при синтезе инвариантных корреляционных	1
фильтров с минимизацией шума и энергии корреляцииБЫКОВСКИЙ А.Ю.	165
Метод описания многопараметрической модели автономного агента	
с помощью дискретной k-значной логики	.167
ШАУЛЬСКИЙ Д.В.	
Повышение качества изображения в фиброскопах оптической	
системы контроля	.169
КАМИНСКАЯ Т.П., КОЧИКОВ И.В., НЕЧИПУРЕНКО Д.Ю., ПОПОВ В.В.	
Улучшение качества изображения дифракционных оптических	
элементов, рассчитанных итеративными методами	171
НИКОЛАЕВА Т.Ю., ПЕТРОВ Н.В.	
Обработка изображений и голограмм в задаче характеризации частиц	173
ЗААЛИШВИЛИ Н.Ю., КАЛЕНКОВ С.Г.	
О цифровом методе расчета и визуализации фазового профиля	
микрообъекта в задачах гиперспектральной голографической	175
фурье-микроскопии	1/5
КОТОВА Е.И., СМИРНОВА А.Л.	177
Голограммный баллистический гравиметрГРЕБЕНЮК К.А.	1//
	170
Математическая модель цифрового матричного фотодетектораКОЗЛОВ К.В., СОЛЯКОВ В.Н., КУЗНЕЦОВ П.А., ПОЛЕССКИЙ А.В.	1/5
Математическая модель многорядного матричного фотоприемного	
устройства с режимом временной задержки и накопления	121
устроиства с режимом временной задержки и наконления БОРИСКЕВИЧ А.А., ЕРОХОВЕЦ В.К., ТКАЧЕНКО В.В.	101
Модели цифровых квантованных голограмм Фурье и Френеля	183
исмаилов д.а., жумалиев к.м., аккозов а.д., жээнбеков а.а.	105
Голографическая память цифровой информации на основе	
синтезированных голограмм	185
P	

БЕТИН А.Ю., БОБРИНЁВ В.И., ДОНЧЕНКО С.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.
ОДИНОКОВ С.Б., СТАРИКОВ Р.С.
Построчная система считывания мультиплексированных одномерных
фурье-голограмм для голографической памяти
КАЛЕНКОВ С.Г., КАЛЕНКОВ Г.С., ШТАНЬКО А.Е.
Гиперспектральная голография микрообъектов в некогерентном свете189 БОНДАРЕВА А.П., ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., СТАРИКОВ С.Н.
Схема оптического кодирования изображений с цифровым вводом
информации и изменяемым кодирующим ключом на базе
двух ЖК ПВМС
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КУРБАТОВА Е.А., СТАРИКОВ С.Н., ЧЕРЁМХИН П.А.
Сжатие цифровых голограмм для систем 3D-наблюдения
и медико-биологических приложений
БЕЛАШОВ А.В., ПЕТРОВ Н.В., СЕМЕНОВА И.В.
Применение алгоритмов цифровой голографии для обработки
голографических интерферограмм быстропротекающих
волновых процессов
ЛЯЛЮШКИН Л.С., ПАВЛОВ А.В.
Влияние параметров регистрирующих сред на характеристики
динамических режимов 4f схемы голографии Фурье198
ЖУМАЛИЕВ К.М., ИСМАИЛОВ Д.А., ЖЭЭНБЕКОВ А.А.,
ДЕМЬЯНОВИЧ П.Д., АБАКИРОВА Ж., САРЫБАЕВА А.А.
Улучшение записи дифракционных решеток в Дот-матрикс голограммах200
КУДРЯВЦЕВ П.В., МАНУХИН Б.Г., АНДРЕЕВА О.В.
Исследование температурных эффектов при записи голограмм
на полимерном материале
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ЖУМАЛИЕВ К.М.
О скоростной записи голограмм на фототермопластических носителях204
КОЛЮЧКИН В.В., ОДИНОКОВ С.Б.
Методика контроля подлинности защитных голограмм
КУЗЯКОВ Б.А., ТИХОНОВ Р.В., ШМЕЛЕВ В.А.
Оценки влияния атмосферных помех в лазерных телекоммуникационных
каналах Земля – спутник
КУЗЯКОВ Б.А., ТИХОНОВ Р.В.
Селективные световоды по модам углового орбитального момента
фотонов в оптической комбинированной линии телекоммуникации210
ПЛЁНКИН А.П.
Повышение защищенности процесса вхождения в синхронизм системы
квантового распределения ключей
ЗАЧИНЯЕВ Ю.В.
Экспериментальное исследование узла формирователя ЛЧМ-сигналов
на основе бинарных волоконно-оптических структур214

ВИНОГРАДОВА И.Л., СУЛТАНОВ А.Х., МЕШКОВ И.К., АНДРИАНОВА А.	В.,
АБДРАХМАНОВА Г.И., ГРАХОВА Е.П.	
Подход к преобразованию спектра широкополосного сигнала	
оптической частью системы RoF	.216
ВИНОГРАДОВА И.Л.	
Применение частотной модуляции оптических импульсов	
для нереляционного управления волоконно-оптической сетью	
РЯБЧЁНОК В.Ю., БЕЗПАЛЫЙ А.Д., ВЕРХОТУРОВ А.О., ТИМОФЕЕВ А.Н.,	
АБРАМОВА А.В., ЕРЕМЕЕВА А.А., ШАНДАРОВ В.М.	
Исследование воздействия интенсивного лазерного излучения	
на свойства ниобата лития в волноводном слое	220
КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А.,	
СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М.	
Исследование электрооптических свойств и фазового состава	
протонно-обменных волноводов в кристаллах LiNbO ₃	.222
ПАРАНИН В.Д., ПАНТЕЛЕЙ Е.	
Спектр пропускания ниобата лития различных производителей	.224
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.	
Интерференция сходящихся лучей в монокристаллах LiNbO ₃ :Gd	226
ЛИТВИНОВА В.А., ЛИТВИНОВ В.А.	
Моделирование апконверсии в нелинейных кристаллах	228
ГРИБЕНЮКОВ А.И., ВЕРОЗУБОВА Г.А., ОКУНЕВ А.О.	
Получение нелинейно-оптического материала ZnGeP ₂ и его свойства	.230
АСАЛХАНОВА М.А., РОМАШКО Р.В.	
Влияние гиротропии на двухволновое взаимодействие на динамических	
голограммах в фоторефрактивных кристаллах	232
КАЗАК А.А., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ТОЛСТИК А.Л.	
Управляемые дифракционные структуры на основе фотоориентации	
жидких кристаллов	.234
ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., МАКАРЕВИЧ А.В., ШАНДАРОВ С.М.	
Оптимизация выходных характеристик смешанных голограмм	
в кристалле ВТО произвольного среза	.236
ВАЖИНСКИЙ О.Т., ПАРГАЧЁВ И.А., СЕРЕБРЕННИКОВ Л.Я.,	
КРАКОВСКИЙ В.А., ШАНДАРОВ С.М., ТАРАСЕНКО К.С.	
Температурная зависимость коэффициента контрастности	
электрооптических затворов на основе высокоомного кристалла КТіОРО4.	238
КУРОЧКИНА М.А., ЩЕРБИНИН Д.П., КОНШИНА Е.А.	
Оптические свойства нематических жидких кристаллов, допированных	
полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/ZnS	240
АРАПОВ Ю.Д., ГРЕЧИН С.Г.	
Влияние термодеформационных процессов на температурную ширину	
синхронизма в различных кристаллах нелинейно-оптического	
преобразования частоты	242

КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М.	
Поглощение и спонтанное излучение света молекулой вблизи	
металлической наночастицы во внешнем магнитном поле	.244
ЛИВАШВИЛИ А.И., ЯКУНИНА М.И., КОСТИНА Г.В., КРИШТОП В.В.,	
ЛИХОВОДОВА Т.Б.	
Динамика концентрации наночастиц в жидкофазной среде,	
находящейся под воздействием периодического светового поля	.246
БАЗЗАЛ Х., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П.	
Исследование влияния междуимпульсного интервала на процессы образова	ния
наночастиц и фракталов оксидов олова при напылении тонких пленок	
на поверхность стекла сдвоенными лазерными импульсами в воздухе	.248
УМРЕЙКО Д.С., ВИЛЕЙШИКОВА Е.В., КОМЯК А.И., ЗАЖОГИН А.П.,	
УМРЕЙКО С.Д.	
Исследование процессов образования нанокластеров оксидов урана	
и алюминия на поверхности оксидированного алюминия сдвоенными	
лазерными импульсами	.250
КИСЛОВ Д.А.	
Влияние плазмонных наночастиц серебра на фотоэлектрические	
свойства солнечных ячеек Гретцеля	.252
ИЗМОДЕНОВА С.В., КИСЛОВ Д.А., КУЧЕРЕНКО М.Г.	
Влияние серебряных наночастиц на скорость безызлучательного	
переноса энергии электронного возбуждения между молекулами	
внутри обратных мицелл	.254
ПРОХОРОВ С.Д., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Исследование флуоресценции сильноразбавленных растворов	
полупроводниковых квантовых точек на основе селенида кадмия	.256
БАЗЗАЛ Х., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П.	
Спектральные исследования процессов при напылении тонких пленок	
оксидов цинка и меди из латуни на поверхность стекла сдвоенными	
The state of the s	.258
УМРЕЙКО Д.С., ВИЛЕЙШИКОВА Е.В., ЗАЖОГИН А.А., КОМЯК А.И.,	
ЗАЖОГИН А.П.	
Спектральные исследования процессов фотохимического образования	
	.260
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П.	
Особенности электрохемилюминесценции при получении	
нанопористого оксида алюминия в щелочной среде	262
ЗВАЙГЗНЕ М.А., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А., САМОХВАЛОВ П.С.	
Исследование влияния поверхностных лигандов на люминесцентные	
свойства квантовых точек селенида кадмия в матрице	
полиметилметакрилата	.264
ГОРЯЕВ М.А., СМИРНОВ А.П.	
Люминесценция адсорбированного красителя и спектральная	
сенсибилизация	.266

КЛЮКИН Д.А., ЛЕОНТЬЕВА В.С., СИДОРОВ А.И., ИГНАТЬЕВ А.И., НИКОНОРОВ Н.В.	
Запись оптической информации в люминесцентных стеклах	
при облучении УФ-лазером	268
ЕГОРЫШЕВА А.В., ФЕДОТОВ П.В., ОБРАЗЦОВА Е.Д., МЕЛЕХОВ А.П.,	
ДУДКИНА Т.Д.	
Новые люминофоры на основе стекол состава 60B ₂ O ₃ –32CaF ₂ –8Bi ₂ O ₃ ,	
легированных Cr и Nd	270
СЕРГЕЕВ М.М., ВЕЙКО В.П., МАТУЗИН Е.И.	
Особенности лазерно-индуцированной кристаллизации в объеме	
фоточувствительных стекол	272
ДЁМИЧЕВ И.А., СИДОРОВ А.И., НИКОНОРОВ Н.В.	
Влияние особенностей ионного обмена на валентное состояния меди	
в силикатном стекле	274
ВАРТАПЕТОВ С.К., ГАНИН Д.В., ЛАПШИН К.Э., ОБИДИН А.З.	
Формирование циклических внутриобъемных структур в прозрачных	
диэлектриках с помощью фемтосекундного лазера	276
ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СЕРГЕЕВ М.М., КОСТЮК Г.К., ВЕЙКО В.П.,	
ЯКОВЛЕВ Е.Б.	
Лазерно-индуцированное формирование микрооптических элементов	
на поверхности стекла	278
ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А.	
Изготовление интегрально-оптических схем с рупорообразным	
элементом ввода в стеклянных подложках	280
ВЕЙКО В.П., КАРЛАГИНА Ю.Ю., ОДИНЦОВА Г.В., СКУРАТОВА А.Л.,	
СНЫТКИНА Д.А., ЯЦУК Р.М.	
Лазерное формирование цветных структур на металлических	
поверхностях методом послойного наращивания оксидных пленок	282
МИРОННИКОВ Н.Г., КОРОЛЬКОВ В.П.	
Полимерный термооптический корректор для компенсации тепловой	
линзы твердотельных лазеров	284
АНАНЬИН О.Б., БОГДАНОВ Г.С., ГЕРАСИМОВ И.А., МЕЛЕХОВ А.П.,	
НОВИКОВ И.К., ПИРОГ В.В.	
Исследование влияния лазерной плазмы на пространственно-временное	
распределение интенсивности мощного лазерного излучения	286
БАБАНИН В.Ф., МАЙЕР Б.А., ИВАНОВ А.В., МИХАЛЕВА Н.В.,	
ОМЕЛЬЯНЮК Ю.Г.	
Применение мёссбауэровской спектроскопии на ⁵⁷ Fe и магнитометрии	
для изучения биосинтеза магнитоупорядоченных минералов в живом	
веществе и почвах	288
БАБАНИН В.Ф., ИВАНОВ А.В., ФРОЛОВ В.В.	
Происхождение и состав сильномагнитной фазы почв по данным	200
мёссбауэровской спектроскопии на ⁵⁷ Fe и магнитометрии	290

АНТОНОВА И.А., БОЛЬШАКОВ А.П., ЮРОВ В.Ю.	
Спектроскопия СВЧ-разряда при CVD росте монокристаллического	
алмаза	292
МИТЯГИН Ю.А., КУЗИЩИН Ю.А., КРИВЕНКОВ В.И., САВИНОВ С.А.,	
КОЗЛОВСКИЙ К.И., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Исследование мощности и спектра терагерцового излучения	
фотопроводящих диодов на основе GaAs под воздействием	
фемтосекундного лазера	294
ШИШКАНОВ О.Н., БОЙЧЕНКО А.П.	
О топографии оптических центров формирования электрополевых	
изображений на галогенсеребряной фотопленке Agfa	296
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	
Возможности активно-импульсных приборов ночного видения	
при работе в ухудшенных условиях наблюдения	298
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	
Бинокулярные телевизионные очки ночного видения	300
АНДРЕЕВ Д.С., БУДТОЛАЕВ А.К., БУДТОЛАЕВА А.К.,	
ХАКУАШЕВ П.Е., ЧИНАРЕВА И.В.	
Минимизация емкости PIN-фотодиодов на основе гетероструктуры	202
InGaAs/InP	302
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	204
Псевдобинокулярные очки ночного видения с коаксиальным объективом. ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	304
Асимметричные псевдобинокулярные очки ночного видения	206
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ТАСКИНА Л.А., ТРЕГУБ Н.В.,	500
СЕЛЕЗНЕВА Е.А.	
Оптические методы для оценки степени дегазации водорода	
в городских территориях	308
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ТАСКИНА Л.А., ВОЛОВА Л.Т.,	500
ПОНОМАРЕВА Ю.В.	
Оптические методы исследований влияния процесса деминерализации	
на органоминеральную структуру костной ткани	310
МАЛОВ А.Н., ВАЙЧАС А.А., НОВИКОВА Е.А.	
Влияние лазерного излучения на процесс роста желчных камней	312
3AXAPOB M.C., 3AXAPOB C.M.	
Исследование фотоплетизмограмм сердечного ритма методом	
вейвлет-анализа	314
РОМАШКО Р.В., БЕЗРУК М.Н., ЕРМОЛАЕВ С.А.	
Гидрофон на основе адаптивного волоконно-оптического	
интерферометра	316
РЯБУХО П.В., САВОНИН С.А., ШАПОШНИКОВ О.А., РЯБУХО В.П.	
Цифровая голографическая интерферометрия температурных изгибных	
деформаций электронных плат	318

ТКАЧЕНКО В.В.	
Интегральные светодиодно-матричные модули для растровых	
	320
БЫЧКОВСКИЙ Я.С., ДРАЖНИКОВ Б.Н., КОЗЛОВ К.В.,	
КОНДЮШИН И.С., СОЛЯКОВ В.Н.	
Установка измерения параметров фотоприемного модуля с временной	
задержкой накопления на основе кадмий-ртуть-теллур	.322
ИВАНОВ А.Ю., ЛЯВШУК И.А., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Анализ влияния аберраций на точность измерительного контроля	
прозрачных клиновидных подложек дифракционных элементов	324
КОМОЦКИЙ В.А., СУЕТИН Н.В., ЧЕХАНОВСКИЙ Д.С.	
Исследование дифракции волн 10.6 мкм на отражающих	
дифракционных решетках	.326
ЛЯВШУК И.А., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Реализация измерительного контроля подложек микроструктурированных	
элементов с помощью одноканальных лазерных интерферометров	328
КОЛЧИНСКИЙ В.А., РОМАШКО Р.В.	
Измерение показателя преломления с помощью лазерного	
профилометра	330
КРЮКОВ Н.А., ПЕГАНОВ С.А.	
О точности и надежности оптических измерений динамических	
характеристик	332
МАЛОВ А.Н., ВАЙЧАС А.А.	
Распределение лазерного излучения в пористой рассеивающей среде,	
повергающейся компрессионному воздействию	.334
КУЧЕРЕНКО М.Г., РУСИНОВ А.П.	
Интерференционные эффекты молекулярного поглощения света вблизи	
сферической металлической наночастицы	.336
СЕМЕНОВА Л.Е.	
Гиперкомбинационное рассеяние в полупроводниках A_2B_6	.338
ИВАНОВА С.В.	
Квазиупругое рассеяние излучения в кварце	.340
АСТАШКЕВИЧ С.А.	
Информация Фишера колебательных состояний двухатомной молекулы	342
АВЕРБУХ Б.Б.	
Преломление плоской S-поляризованной электромагнитной волны	
на границе раздела вакуум-среда из электрических и магнитных	
	344
КОТЛИКОВ Е.Н., ЮРКОВЕЦ Е.В.	
Анализ возможности применения численных методов для определения	
	.346
ЯБЛОКОВА Л.В., ГОЛОВАШКИН Д.Л.	
Реализация совместного разностного решения уравнений Даламбера и	2.40
Максвелла с учетом частотной дисперсии на GPU	348

ЛИТВИНОВА В.А., ЛИТВИНОВА М.Н., КАРПЕЦ Ю.М.	
Генерация второй гармоники в волокнах с периодически наведенной	
нелинейностью	.350
БАЛБЕКИН Н.С., ПЕТРОВ Н.В.	
Особенности моделирования дифракционного распространения	
широкополосного двумерного терагерцового поля	.352
СЕМКИН А.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.	
Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур	
при плавной пространственной неоднородности управляющего поля	.354
КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А.	
Исследование когерентных оптических систем обработки информации	
с жидкокристаллическим устройством ввода	.356
БУБИС Е.Л., БУДАГОВСКИЙ И.А., ЗОЛОТЬКО А.С., СМАЕВ М.П.,	
ШВЕЦОВ С.А.	
Переключение знака контраста изображения при использовании	
нелинейного жидкокристаллического фильтра	.358
ЕВТИХИЕВ Н.Н., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ПЕТРОВА Е.К., СТАРИКОВ Р.С.,	
ШАУЛЬСКИЙ Д.В.	
Инвариантные фильтры с минимизацией шума и энергии корреляции:	
исследование характеристик распознавания изображений,	
- J	.360
КАЛЕНКОВ Г.С., МИРОНОВ С.Н., ШТАНЬКО А.Е.	
Моделирование волновых аберраций высокоапертурной	
r	.362
ЗАКАРЕЕВА А.Р., СТАРИКОВ С.Н., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Методика моделирования снимка, учитывающая шумы	
и радиометрические параметры регистрирующих камер	.364
КРАСНОВ В.В., СТАРИКОВ Р.С., СТАРИКОВ С.Н., ЭРЬКИН И.Ю.	
Моделирование влияния флюктуаций фазы в ЖК ПВМС на качество	200
оптического восстановления киноформов	.366
СИДЯКИНА З.А.	260
Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения	.368
ЧЕРЁМХИН П.А., КРАСНОВ В.В., КУРБАТОВА Е.А., СТАРИКОВ Р.С.,	
СТАРИКОВ С.Н.	
Метод увеличения отношения сигнал/шум снимков с помощью портретов	270
световых и темновых пространственных шумов фотосенсоров камер	.3/0
БОРИСОВ В.Н., ВЕНИАМИНОВ А.В.	
Определение амплитуд модуляции показателя преломления и коэффициент	ra
поглощения из контуров угловой селективности голограмм, записанных	277
в полимерном материале с фенантренхинономГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А., ЧЕРНЫХ Д.Ф.	.312
Влияние методов формирования случайных рельефно-фазовых	
голографических структур на их характеристики	37/
голографических структур на их характеристики	4 ر.

ЛЕСНИЧИЙ В.В., ПЕТРОВ Н.В., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Улучшение качества цветных цифровых голограмм	376
САВОНИН С.А., РЯБУХО П.В., РЯБУХО В.П.	
Интерполяционная постобработка цифровых голограмм	
сфокусированного изображения	378
ШЕВКУНОВ И.А., ПЕТРОВ Н.В.	
Осевая цифровая голография фазовых шагов с вращающейся	
плоскопараллельной пластиной	380
ПОРШНЕВА Л.А., КРАСНОВ В.В., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Динамическое воспроизведение объемных сцен с регистрируемых	
цифровых голограмм	382
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ОДИНОКОВ С.Б., СТАРИКОВ Р.С.	
Особенности использования методов корреляционного распознавания	
изображений в устройстве контроля подлинности защитных	
голографических знаков	384
МОЛОДЦОВ Д.Ю., РОДИН В.Г., СТАРИКОВ С.Н.	
Возможность использования DMD-модуляторов для отображения	
голографических фильтров в схеме дисперсионного коррелятора	386
Именной указатель авторов	388
J 1	

А.С. БИРЮКОВ, И.А. БУФЕТОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ: ОТ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДО СВЕТОВОДОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ ГРАНИЦЫ СЕРДЦЕВИНА-ОБОЛОЧКА

Дан обзор свойств оптических волоконных световодов различных типов с полой сердцевиной (простых стеклянных капилляров, брэгговских световодов, фотонно-кристаллических световодов, световодов с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка (СОКГ)) и их возможных применений. Представлены результаты экспериментального исследования свойств СОКГ из кварцевого стекла, предложенных и изготовленных в НЦВО. Несмотря на непрозрачность кварцевого стекла в диапазоне длин волн от 2.5 до 8 мкм, созданные СОКГ характеризуются оптическими потерями менее 40 дБ/м для основной моды в указанном диапазоне, и 50 дБ/км на длине волны 3.39 мкм.

A.S. BIRIUKOV, I.A. BUFETOV

Fiber optics research center of the RAS, Moscow

HOLLOW CORE OPTICAL FIBERS: FROM PHOTONIC CRYSTAL FIBERS TO THE FIBERS WITH NEGATIVE CURVATURE OF THE CORE-CLADDING BOUNDARY

The optical properties of various types of hollow core fibers (simple glass capillaries, Bragg fibers, photonic crystal fibers, fibers with negative curvature of the core-cladding boundary (NCHCFs)) are reviewed and their possible applications are considered. The results of experimental investigation of special silica NCHCFs devised and prepared in FORC are presented. In spite of opacity of silica in the wavelength range 2.5-8 µm the NCHCFs developed demonstrate fundamental mode optical losses < 40 dB/m within this wavelength range and 50 dB/km at the wavelength of 3.39 µm.

За последние ~20 лет были созданы новые типы волоконных световодов, в которых распространение света основано на принципах, отличных от полного внутреннего отражения (например, фотоннокристаллические световоды [1]). Отказ от полного внутреннего отражения позволяет создавать световоды с полой сердцевиной. И в настоящее время уже созданы световоды с полой сердцевиной с оптическими потерями менее 1.2 дБ/км на длине волны 1620 нм [2]. Световоды такого типа могут использоваться для оптической передачи информации со скоростью света

в вакууме, в качестве газовых, жидкостных или химических датчиков, для транспортировки мощного излучения в промышленных или медицинских целях, для создания новых типов источников излучения на основе нелинейных явлений (при условии заполнения сердцевины газом) и т.д. В последнее время предложены новые конструкции световодов с полой сердцевиной (с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка [3, 4],рис. 1а), отличающиеся очень малым проникновением распространяющегося световоду электромагнитного поля ПО конструкционный материал световода. Это позволяет, например, использовать световоды такого типа далеко за пределами привычных областей прозрачности поскольку световодов, распространяющейся моды могут быть на 3 порядка ниже, чем потери излучения в материале световода (рис. 16). В докладе будут рассмотрены результаты последних исследований в этой области, дан обзор свойств световодов с полой сердцевиной и обсуждены проблемы, стоящие на пути их широкого применения.

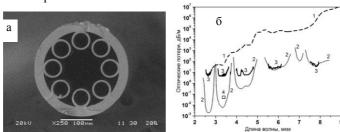


Рис. 1. Изображение скола световода из кварцевого стекла с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (а); 1 - коэффициент поглощения в кварцевом стекле в зависимости от длины волны; 2 - расчетные значения потерь основной моды в световоде (скол которого показан на рис. 1а); 3 - измеренные значения оптических потерь в этом же световоде; 4 - измеренное значение потерь в световоде на длине волны 3.39 мкм, полученное с помощью излучения He-Ne лазера [4] (б)

- 1. Russell P.St. Photonic crystal fibers // Science. 2003. V.299(5605). P.358-362.
- 2. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., et al. Ultimate low loss of hollow core photonic crystal fibers $\!\!\!/\!$ Opt. Express. 2005. V.13. P.236-244.
- 3. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., et. al. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region > 3.5 µm // Opt. Express. 2011. V.19(2). P.1441-1448.
- 4. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region // Opt. Express. 2013. V.21(8). P.9514-9519.

В.В. ПРОКЛОВ

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ЭФФЕКТЫ МНОГОЧАСТОТНОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ С МАЛЫМИ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ

Дается обзор современного состояния исследований в области интермодуляционных акустооптических (AO) эффектов при многочастотной брэгговской дифракции света. Рассматриваются различные способы снижения, а в некоторых случаях почти полного подавления, указанных эффектов.

V.V. PROKLOV

Fryazino branch of Kotel'nikov institute of radioengineering and electronics of RAS

EFFECTS OF MULTIFREQUENCY ACOUSTO-OPTIC BRAGG DIFFRACTION WITH MINOR INTERMODULATION DISTORTIONS

Overview of current state of research in the area of intermodulation acousto-optic effects at light multifrequency Bragg diffraction is given. Various methods of reduction and in some cases almost total suppression of these effects are considered.

В ряде работ, начиная с классической работы Д. Хехта [1], было установлено, что в условиях АО взаимодействия с многочастотным звуком обычно проявляются особые механизмы нелинейных процессов, обусловленные интермодуляционными явлениями высших порядков, которые вносят существенные искажения в дифракционное поле по сравнению с одночастотными представлениями. Выяснилось, что эти процессы серьезно изменяют характеристики многочастотной АО дифракции, и, как следствие, ограничивают параметры АО устройств, используемых как в области линейной обработки информации, так и в системах управления параметрами лазерного излучения, причем как при малых, так и при больших эффективностях АО дифракции.

Актуальность данного направления недавно сильно возросла после работ авторов из ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН, в которых методом приближенного решения обратной задачи для многочастотной АО дифракции установлены условия при которых вредные

интермодуляционные эффекты могут быть существенно подавлены [2-4]. Было показано, что даже при сильном АО взаимодействии, когда роль интермодуляционных искажений особенно велика, их влияние может стать малозначительным при условиях подобающего выбора геометрии анизотропной AO дифракции кристаллической среде соответствующем программируемом управляющих многочастотных акустических сигналов [5, 6]. Установлена и объяснена закономерность _ интермодуляционные существенно ослабляются по мере того, как совокупный многочастотный акустический сигнал по форме приближается к виду сигнала с угловой модуляцией. Разработан метод синтеза управляющих многочастотных сигналов для получения максимального подавления интермодуляций при картине дифракции первого порядка, разработаны заданной соответствующие программное и аппаратное обеспечения.

Эти результаты открывают также перспективу и целесообразность изучения AO взаимодействия в условиях, когда, например, полихроматический свет должен взаимодействовать с многочастотным звуком без возникновения упомянутых выше вредных интермодуляционных последствий.

На базе развитых методов созданы первые образцы многолучевых модуляторов и дефлекторов с уникальными техническими параметрами: эффективность дифракции не ниже 90% при числе лучей до 8 [7, 8], успешно развиваются проекты по их использованию при создании многочастотных согласованных АО фильтров света с целью построения некогерентных оптических систем передачи данных и гиперспектральных датчиков дистанционного зондирования Земли [9, 10] и т.п.

- 1. Hecht D.L.. Multifrequency acoustooptic diffraction // Ultrasonics. 1977. P.7-18.
- 2. Proklov V.V., Antonov S.N., Rezvov Yu.G., Vainer A.V. // Proc. of IEEE Intern. Ultrasonics symp. 2006. Vancouver. P.248-251.
- 3. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Радиотехника и электроника. 2008 Т.53. №4. С.478-485.
 - 4. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В. // ЖТФ. 2008. Т.78. Вып.6. С.79-83.
 - 5. Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Rezvov Yu.G. // Appl.Opt. 2009. V.48. P.171-181.
 - 6. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Нелин. мир. 2008. №4. С.272.
 - 7. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В. // ПЖТФ. 2011. Т.37. Вып.11. С.83-90.
- 8. Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Rezvov Yu.G. // Universal Journal of Physics and Application. 2014. N2. P.90-95.
- 9. Проклов В.В., Бышевский-Конопко О.А., Григорьевский В.И. // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №9. С.905–915.
 - 10. Proklov V.V. // Digest of 12th Intern. school on acousto-optics and applications. 2014. P.30.

В В МОРАРЕНКО

ООО «Кейсайт Технолоджиз», Москва

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ KEYSIGHT TECHNOLOGIES ДЛЯ АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Компания Keysight Technologies (ранее – группа электронных измерений Agilent Technologies) является единственным поставщиком контрольно-измерительного оборудования, который предлагает технические решения всего цикла создания телекоммуникационных сетей – от компонентов до центров обработки данных и телекоммуникаций, охватывая такие новейшие технологии, как кремниевая фотоника и когерентная передача сигналов.

V.V. MORARENKO

Keysight Technologies Inc., Moscow

THE UP-TO-DATE KEYSIGHT TECHNOLOGIES METHODS AND SOLUTIONS FOR OPTICAL COMPONENTS ANALYSIS FOR OPTICAL FIBER COMMUNICATION LINES

Keysight Technologies is the only test and measurements vendor which offers solutions along the entire value chain of the communication network from components through data centers to telecom, addressing the latest technologies like silicon photonics and coherent transmission.

Приборы с перестраиваемыми лазерами используются для измерения спектральных характеристик оптических компонентов и материалов. Благодаря высокому и настраиваемому разрешению по длине волны пользователь может быстро получить спектральную зависимость. Измерительные системы могут быть сконфигурированы под потребности конкретного приложения [1].

Один или несколько измерителей оптической мощности в сочетании с перестраиваемым лазерным источником позволяют проводить измерения оптической мощности в зависимости от длины волны. Часто это используется для определения отношения мощности на входе компонента к мощности на выходе, которое обычно называют вносимыми потерями и выражают в дБ. В то время как лазерный источник перестраивает длину волны в выбранном диапазоне, измерители мощности периодически

делают выборки значений мощности с учётом заданного числа точек измерения. Взятие выборок синхронизируется с процессом свипирования источника с помощью сигнала запуска. Таким образом обеспечивается точная связь выборок с соответствующей длиной волны. Данные, собираемые при разных значениях длины волны, синхронизируются с сигналами запуска измерений, поступающими на измерители мощности [1].

На высоких скоростях передачи данных (10 Гб/с и больше) изменения во времени, требуемом для прохождения частей сигнала через сеть, вызывают увеличение длительности (уширение) импульсов данных. Также может быть измерена поляризационная модовая дисперсия с помощью свипирования длины волны на множестве поляризаций, но для этого также в качестве приёмника требуется анализатор поляризации [2]. Этот метод, называемый анализом собственных значений матриц Джонса, поддерживается анализатором компонентов N7788В в сочетании с Эта перестраиваемым лазерным источником. система дифференциальную групповую задержку, поляризационно-зависимые потери, вносимые потери и другие дополнительные параметры за один цикл измерения со свипированием по длине волны с использованием приложения Polarization Navigator из набора прикладных программ N7700A, обеспечивая оптимальную стабильность и скорость измерений.

Для тестирования компонентов высокоскоростных оптических систем передачи данных, а именно электрооптические, оптоэлектронные устройства, оптические компоненты, используется инновационный прибор, называемый анализатор оптических компонентов, построенный на базе векторного анализатора цепей. Следовательно, такое оборудование позволяет определять S-параметры в диапазоне частот до 67,5 ГГц, имеющие различный смысл в измерениях различных типов компонентов. Кроме того, анализатор оптических компонентов позволяет проводить балансные измерения устройств с дифференциальными входами или выходами [3].

- 1. Lightwave catalog volume 1: General Photonic Test 5989-6753EN. Agilent Technologies Inc. 2014.
 - 2. Derickson D. Fiber optic test and measurement. Prentice Hall, 1998.
- 3. Lightwave catalog volume 2: Optical-Electrical / Polarization /Complex Modulation 5989-6754EN. Agilent Technologies, Inc. 2014.

Б.А. КУЗЯКОВ, В.В. МОРАРЕНКО¹, В.А. ШМЕЛЕВ

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

1000 «Кейсайт Технолоджис». Москва

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ И СЕЛЕКЦИИ ОРБИТАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ФОТОНОВ В ОПТИЧЕСКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

В работе рассматриваются методы реализации разнообразных состояний орбитальных угловых моментов фотонов. Показано, что методика с использованием одноосного кристалла, к которому прикладывается электрическое напряжение, позволяет создавать и выделять эти состояния.

B.A. KUZYAKOV, V.V. MORARENKO¹, B.A. SHMELEV

Moscow state technical university of radio-engineering, electronics and automatics Keysight Technologies Inc., Moscow

MODERN METHODS OF IMPLEMENTATION AND SELECTION OF THE ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF PHOTONS IN THE OPTICAL COMBINED COMMUNICATIONS LINE

This paper considers implementation methods of a variety of states of orbital angular momentum of photons. It is shown that the method with using of a single axis crystal, which is under electrical voltage, to allow make and allocate these states.

Относительную устойчивость оптического телекоммуникационного канала, можно повысить на основе использования орбитальных угловых моментов фотонов (УОМ) [1, 2]. Среди методов создания УОМ можно выделить несколько наиболее эффективных.

1. В методе электроконтроля состояний УОМ используют одноосный кристалл стронций-барий-ниобат (СБН), к которому прикладывается электрическое напряжение E^* и четвертьволновые пластины [3]. Возможности метода хорошо иллюстрирует рис. 1, на котором приведена зависимость состояний УОМ, от приложенного напряжения на кристалл СБН, при размере сфокусированного Бессель—Гауссового пучка $w_0=10$ мкм. Из рис. 1 видно, что в рассматриваемой оптической системе могут формироваться разные состояния УОМ: от 0 до 1,8 при изменении напряжения E_0 в диапазоне: -1,6883 - + 4 кВ/мм.

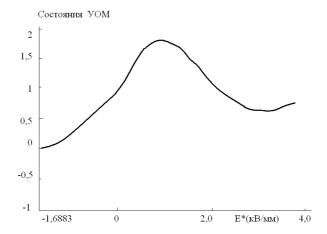


Рис. 1. Зависимость состояний УОМ от E^*

2. В другом методе генерации выбранных состояний УОМ, используют нелинейное кольцевое кварцевое волокно и параметрическую конверсию «вниз» [4]. При создании термической нелинейности в кольцевом волокне с длиной ~ 1 м, реализована высокая квантовая эффективность процесса.

В рассмотренных методах могут быть реализованы различные состояния УОМ для многообразных оптических комбинированных линий телекоммуникаций.

- 1. Sanchez D.J., Oesch D.W. Localization of angular momentum in optical waves propagating through turbulence // Optics Express. 2011. V.19. Is.25. P.25388-25396.
- 2. Кузяков Б.А., Тихонов Р.В. К проблеме повышения доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Труды III-й Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С.23-24.
- 3. Zhu C.W., She W. Electrically controlling spin and orbital angular momentum of a focused light beam in a uniaxial crystal // Optics Express. 2012. V.20. Is.23. P.25876-25883.
- 4. Javurek D., Svozilik J., Perina Jr.J. Proposal for the generation of photon pairs with nonzero orbital angular momentum in a ring fiber // Optics Express. 2014. V.22. No.19. P.23743-23748.

М.С. ЕЛЕЗОВ 1 , Р.В. ОЖЕГОВ 1,3 , Ю.В. КУРОЧКИН 2 , В.В. КОВАЛЮК 1,3 , Ю.Б. ВАХТОМИН 3 , Г.Н. ГОЛЬЦМАН 1,4

¹Московский педагогический государственный университет ²Российский квантовый центр, Сколково ³340 «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва ⁴Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ

ПЕРЕДАЧА КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ФОТОНОВ НА РАССТОЯНИЕ СВЫШЕ 300 КИЛОМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В работе продемонстрирована возможность использования сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD) [1] для реконструкции поляризационных состояний фотонов на расстоянии свыше 300 км. При этом детектор обладал квантовой эффективностью свыше 20 % и скоростью темного счета 10 Гц. Благодаря этому, удалось добиться скорости передачи квантовых состояний фотонов 7 бит/с и квантового уровня ошибок (QBER) 5.1%.

M.S. ELEZOV¹, R.V. OZHEGOV^{1,3}, Yu.V. KUROCHKIN², V.V. KOVALYUK^{1,3}, Yu.B. VAKHTOMIN³,G.N. GOLTSMAN^{1,4}

¹Moscow state pedagogical university

²Russian quantum center, Skolkovo

³CJSC "Superconducting nanotechnology", Moscow

⁴Higher school of economics Moscow institute of electronics and mathematics

POLARIZATION STATE RECONSTRUCTION AND MEASUREMENT OVER 300 KM PERFORMED WITH A SUPERCONDUCTING SINGLE PHOTON RECEIVER

In this paper, we discuss the possibility of employment superconducting single-photon detectors [1] for polarization state reconstruction and measurement over 300 km. SSPDs have quantum efficiency above 20% and dark count rate about 10 Hz. Because high SSPD characteristics we have the bit rate 7 bit/s and quantum bit error rate 5.1%.

Для демонстрации передачи квантовых состояний фотонов использовалась установка, работающая на протоколе BB84 (рис. 1). В качестве квантовых состояний мы использовали поляризацию одиночных фотонов. Квантовые состояния передавались от передатчика (блок «Алиса») к приемнику (блок «Боб»). Блок «Алиса» с помощью DFB

лазера посылает оптические импульсы на длине волны 1550 нм с частотой повторения 32 МГц. Аттенюатором и измерителем мощности излучение ослаблялось до 0.2 фотонов в импульсе и с помощью поляризационного контроллера PC1 готовили поляризацию фотонов. В качестве квантового канала было использовано одномодовое оптоволокно Corning SMF-28e длиной 302.4 км с потерями 0.166 дБ/км на длине волны 1550 нм. Таким образом, общие потери на квантовом канале составили 50.2 дБ. Блок «Боб», принимая оптические импульсы, восстанавливает поляризацию фотонов с помощью контроллера поляризации PC2.

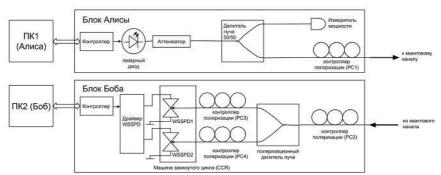


Рис. 1. Экспериментальная установка по передаче квантовых состояний

В эксперименте для регистрации одиночных фотонов использовалась двухканальная машина замкнутого цикла. В криостате машины были сверхпроводниковые однофотонные установлены детекторы, с одномодовым оптоволокном. Так как сопряженные детекторы поляризационночувствительны, то для настройки на максимальную квантовую эффективность применялись контроллеры поляризации РСЗ и РС4. В результате у обоих детекторов квантовую эффективность была свыше 20% на длине волны 1550 нм и темновой счет 10 Гц при температуре 2 К. Таким образом, за счет высокой чувствительности и низких шумов детекторов удалось передать квантовые состояния фотонов на расстоянии 302.4 км со скоростью передачи квантовых состояний 7 бит/с при уровне квантовых ошибок (QBER) 5.1 %.

Список литературы

1. Goltsman G.N., et. al. Picosecond superconducting single-photon optical detector // Applied physics letters. 2001. V.79. P.705.

В.Н. ЗВЕГИНЦЕВ, С.И. ИВАНОВ, А.П. ЛАВРОВ, И.И. САЕНКО

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований основных характеристик ряда вариантов построения BO линий передачи сверхширокополосных аналоговых сигналов применением элементов радиофотоники.

V.N. ZVEGINTZEV, S.I. IVANOV, A.P. LAVROV, I.I. SAENKO Saint-Petersburg state polytechnical university

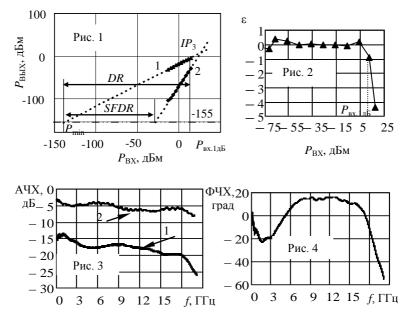
THE CHARACTERISTICS OF ANALOG FIBER-OPTIC LINKS FOR ULTRA-WIDEBAND SIGNALS TRANSMISSION

The results of experimental investigation of the main characteristics of some fiberoptic links based on microwave photonics elements for ultra-wideband analog signals transmission are given.

При создании современных сверхширокополосных радиоэлектронных систем (РЭ) различного назначения (радиолокация, радиомониторинг и др.) все более широкое применение находят компоненты радиофотоники [1]. При этом в качестве «базовой» структуры при компоновке ряда таких РЭ систем, например, диаграммообразующих схем для многоэлементных ФАР [1, 2], можно выделить одноканальную волоконно-оптическую (ВО) линию передачи широкополосных радиосигналов, параметры которой определяют достижимые характеристики всей системы обработки.

Нами исследованы несколько вариантов построения ВО линий передачи сверхширокополосных (более 4 октав, до 20 ГГц) аналоговых сигналов, работающих по принципу IM-DD [1, 2], с использованием различных функциональных элементов волоконной и интегральной оптики из числа представленных на рынке. В данной работе приведены результаты измерений основных рабочих характеристик макетов ВО линий передачи: АЧХ, ФЧХ, передаточной, пороговой чувствительности, динамического диапазона, интермодуляционных искажений, уровня шумов и др. ВО линии были скомпонованы с применением следующих компонентов. Первая линия: излучатель LDI-DFB-1550-20/80 на основе DFB-лазера (Lasercom); интегрально-оптический модулятор на основе

интерферометра Маха-Цендера IM-1550-20-а (Optilab); фотоприемный модуль (ФПМ) из состава линии SCML-100M18G (MITEQ). Вторая линия: специализированные модули (приемник и передатчик) RoF Link OTS-2-18 представлена (Emcore). Ha рис. 1 лля примера передаточная характеристика первой ВО линии, измеренная по бигармоническому сигналу с частотами 3.99 ГГц и 4.00 ГГц: уровень 1-ой гармоники (линия 1) и интермодуляционной компоненты третьего порядка (2), а также шума P_{III} = -155 дБ, регистрируемый на выходе $\Phi\Pi M$, приведенный к полосе 1 Γ ц. Точка компрессии $P_{\rm BX,1дE}=13$ дБм по отклонению є передаточной характеристики от линейной зависимости на 1 дБ (см. рис. 2.), динамический диапазон DR линии = 151 дБ. Динамический диапазон, свободный от гармоник входного сигнала. SFDR = 110 дБ. На рис. 3 и 4 приведены АЧХ обеих линий – в виде |S21(f)|, и Φ ЧХ второй – в виде отклонения $\Delta \varphi(f)$ от линейной зависимости, соответственно, измеренные на частотах до 20 ГГц. Ряд других результатов по этим линиям представлен в [2].



Список литературы

- 1. Зайцев Д.Ф. Нанофотоника и её применение. М.: АКТЕОН. 2012.
- 2. Lavrov A.P., Ivanov S.I., Saenko I.I. // Lecture Notes in Comp. Sc. 2014. V.8638. P.647-655.

А.А. ЦАРУК, А.В. ВЫТНОВ, Д.В. ИВАНОВ

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ ПО ОПТОВОЛОКОННОЙ ЛИНИИ ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В работе приведены результаты исследования методов компенсации фазовой задержки опорного сигнала, возникающие при его передаче по оптоволоконной линии. Представлена система передачи высокостабильного сигнала эталонной частоты 100 МГц на радиотелескоп по оптоволоконному кабелю.

A.A. TSARUK, A.V. VYTNOV, D.V. IVANOV Institute of applied astronomy of the RAS, Saint-Petersburg

METHODS OF ULTRA-STABLE SIGNAL TRANSFER VIA FIBER OPTIC CABLE FOR SYNCHRONIZATION OF RADIO ASTRONOMICAL EQUIPMENT

The methods of compensation of a reference signal phase delay variations in fiber optic lines are presented. The system of transfer of a 100 MHz highly stable signal to the radio telescope via a fiber-optical cable is described.

Фазовая и частотная нестабильность стандартов частоты и линий передачи, используемых для формирования опорной частоты на радиотелескопе в радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, ограничивает интервал времени накопления интерференционного отклика и точность наблюдений. Вносимая нестабильность опорной частоты не должна превышать $5\cdot 10^{-15}$ на интервале времени 1 час [1]. По сравнению с радиочастотными кабелями, волоконно-оптические линии обладают лучшей фазовой стабильностью, а также позволяют передавать на радиотелескоп высокостабильный сигнал опорной частоты без влияния электромагнитных помех.

Конструктивно предлагаемая система передачи сигнала опорной частоты на радиотелескоп по волоконно-оптическому кабелю состоит из антенного и наземного блоков. В каждом блоке используется преобразователь из радиочастотного сигнала в оптический и обратно. В качестве передающего лазерного модуля выбран высокочастотный лазерный модуль производства компании «Дилаз» предназначенный для

использования в аналоговых линиях связи. Модуль имеет низкий относительный уровень шума (-140 дБ/Гц), что позволяет сохранять точностные характеристики передаваемого сигнала опорной частоты. В состав модуля входят фотодиод обратной связи, микроохладитель и терморезистор, используемые для стабилизации оптических и электрических параметров лазерного диода. Для исключения воздействия отраженного оптического сигнала на передающий лазерный модуль применяется оптический изолятор.

Небольшие изменения оптической длины пути, возникающие из-за механических и температурных воздействий на оптоволокно, приводят к появлению дополнительных ошибок флуктуации фазы передаваемого опорного сигнала. Использование оптических циркуляторов позволяет возвращать переданный сигнал опорной частоты по тому же волокну и использовать его для компенсации таких воздействий.

В работе исследованы два способа компенсации задержки фазы сигнала в оптоволокне. Первый – использовать пьезоэлектрический сканер длины пути FST-002 [2], как элемент петли фазовой автоподстройки опорной частоты, передаваемой на радиотелескоп по оптоволоконному кабелю. Второй – использовать модифицированную схему электронной стабилизации фазы [3]. Принцип работы схемы электронной стабилизации фазы заключается во включении трех петлей ФАПЧ так, чтобы компенсировать задержку сигнала в оптическом кабеле. Набег фазы в оптическом кабеле вычитается из фазы опорного сигнала и на радиотелескоп приходит сигнал с частотой и фазой сигнала на выходе стандарта частоты и времени.

- 1. Жуков Е.Т. Оценка потерь когерентности из-за фазовой и частотной нестабильности стандартов частоты в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами // Труды ИПА РАН. СПб.: Наука, 2006. Вып.15. С.140-155.
- 2. Царук А.А., Вытнов А.В., Иванов Д.В. Исследование пьезоэлектрического сканера задержки в оптоволоконной линии и возможности его применения для передачи эталонных частот в РСДБ // Труды ИПА РАН. СПб.: Наука, 2014. Вып.28. С.121-128.
- 3. Царук А.А., Вытнов А.В., Иванов Д.В. Применение в РСДБ оптоволоконных линий для передачи сигналов эталонных частот // Труды ИПА РАН. СПб.: Наука, 2013. Вып.27. С.152-156.

И.А. ДОДУХОВА, М.С. БЫЛИНА

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ EDFA С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ

В работе сопоставлены результаты проведенного авторами моделирования оптического усилителя на основе волокна, легированного эрбием, с приведенными в литературе экспериментальными данными и результатами моделирования других исследователей.

I.A. DODUKHOVA, M.S. BYLINA

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg state university of telecommunications

COMPARISON OF MODELING RESULTS OF ERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER WITH RESULTS OF OTHER RESEARCHERS

In this article the authors compared the results of the modeling of the erbium-doped fiber amplifier with those given in the literature experimental data and modeling results of other researchers.

Эрбиевые волоконные усилители (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) широко используются при строительстве протяженных ВОЛС с применением технологии спектрального уплотнения. В [1] представлена математическая модель EDFA, которая для двухуровневой системы она может быть сведена к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{split} n_{1} &= \frac{\sigma_{21}^{p}/\sigma_{12}^{p} \cdot P_{p}\psi_{p}(r)/P_{qu} + \left(P_{s} + P_{a}^{-} + P_{a}^{+}\right)\psi_{s}(r)/P_{sat} + 1}{\left(1 + \sigma_{21}^{p}/\sigma_{12}^{p}\right)P_{p}\psi_{p}(r)/P_{qu} + \left(1 + \sigma_{12}^{s}/\sigma_{21}^{s}\right)\left(P_{s} + P_{a}^{-} + P_{a}^{+}\right)\psi_{s}(r)/P_{sat} + 1}n_{t}, \\ dP_{p}/dz &= -P_{p}\Gamma_{p}\left(\sigma_{12}^{p}n_{1} - \sigma_{21}^{p}n_{2}\right) - \alpha_{p}P_{p}, dP_{s}/dz = P_{s}\Gamma_{s}\left(\sigma_{21}^{s}n_{2} - \sigma_{12}^{s}n_{1}\right) - \alpha_{s}P_{s}, \\ dP_{a}^{+}/dz &= \pm P_{a}^{\pm}\Gamma_{s}\left(\sigma_{21}^{s}n_{2} - \sigma_{12}^{s}n_{1}\right) \pm 2\sigma_{21}^{s}n_{2}P_{0}\Gamma_{s} + \alpha_{s}P_{a}^{\pm} \end{split}$$

где $\Gamma_{p,s}$ — фактор перекрытия полем накачки (сигнала) сердцевины активного волокна; $\sigma_{ij}^{p,s}$ — сечения поглощения (ij=12) и эмиссии (ij=21) для накачки (сигнала); $n_{1,2}$ — населенность уровней 1 и 2; n_t = n_1 + n_2 —

общая населенность уровней 1 и 2; $\psi_{p,s}$ — огибающая поля моды для излучения накачки (сигнала); P_{qu} — пороговая мощность; P_{sat} — мощность насыщения; P_0 — эффективная мощность в диапазоне усиления; $P_{p,s}$ - мощность накачки (сигнала) на входе; P_a^\pm — мощности ASE, распространяющегося в попутном и встречном направлениях, $\alpha_{p,s}$ — коэффициенты затухания для накачки (сигнала).

На основе данной модели было разработано программное обеспечение (ПО), моделирующее работу EDFA [1]. Для подтверждения адекватности модели и справедливости сделанных предположений авторами было проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, приведенными в литературе и результатами моделирования других исследователей.

На рис. 1а представлены результаты расчета зависимости коэффициента усиления смоделированного EDFA от длины волны сигнала при разных значениях мощности сигнала $P_{\rm BX}$ на входе усилителя. Расчеты проведены при следующих параметрах EDFA: длина активного волокна 15 м; радиус сердцевины 1,4 мкм; концентрация ионов эрбия 0,7*10²⁵ион/м³; время жизни на метастабильном уровне 10 мс; $\alpha_p = 60$ дБ/км, $\alpha_s = 40$ дБ/км; радиус модового пятна на длине волны 1550 нм 3,5 мкм; количество каналов: 26; длина волны накачки 1480 нм; входная мощность накачки 20 мВт. На рис. 16 приведены аналогичные зависимости, определенные экспериментально и представленные в [2].

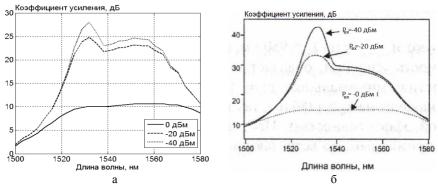


Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления EDFA от длины волны сигнала: результаты моделирования (а), экспериментальные данные (б)

Из рисунков видно, что коэффициент усиления как смоделированного, так и экспериментально исследованного EDFA уменьшается с ростом $P_{\rm Bx}$. Характер зависимости коэффициента усиления смоделированного EDFA от длины волны также соответствует экспериментально полученным данным. К сожалению, поскольку в [2] приведены не все параметры EDFA, некоторые параметры смоделированного усилителя могли отличаться от исследованного в [2]. Этим обусловлено отличие значений коэффициента усиления смоделированного усилителя от исследованного экспериментально.

В работе также проведено сравнение предложенной авторами модели EDFA с моделью, реализованной в программе GainMaster разработки британской компании FIBERCORE — ведущего производителя легированных эрбием волокон. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента усиления от длины активного волокна марки I-4, полученные с помощью разработанного авторами ПО и ПО GainMaster. Из рис. 2 видно, что предлагаемая авторами модель позволяет получить результаты, аналогичные получаемым с помощью модели GainMaster.



Рис. 2. Зависимости коэффициента усиления EDFA от длины волокна

Проведенное в работе исследование подтвердило применимость разработанного авторами ПО для математического моделирования EDFA.

- 1. Додухова И.А., Былина М.С., Математическая модель эрбиевого волоконного усилителя // Сборник научных трудов III Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М: НИЯУ МИФИ, 2014. С.37-38.
 - 2. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы. М: Наука, 2013.
- 3. Fibercore, GainMaster Amplifier Design Software. Manual Revision 1.1, Fibercore Limited, 2004.

О.А. БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО, В.В. ПРОКЛОВ, А.Л. ФИЛАТОВ

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОПОЛОСНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО-КОДИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Предложен и экспериментально исследован генератор спектрально-кодированных оптических сигналов (АО кодер) для систем оптической связи с кодовым разделением каналов множественного доступа (О-CDMA). Разработанный АО кодер базируется на использовании промышленного светодиода и многополосного акустооптического фильтра (МАОФ), управляющие ВЧ сигналы которого были синтезированы с учетом необходимости подавления интермодуляционных эффектов.

O.A. BYSHEVSKI-KONOPKO, V.V. PROKLOV, A.L. FILATOV Fryazino branch of Kotel'nikov institute of radioengineering and electronics of RAS

APPLICATION OF MULTIBAND ACOUSTO-OPTIC FILTERS FOR SPECTRALLY ENCODED SIGNALS GENERATION IN INCOHERENT OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

Spectrally encoded optical signal generator (AO coder) for optical communication systems with code division multiple access channels (O-CDMA) was proposed and experimentally investigated. The AO coder is based on industrial LED and multi-band acousto-optical filter. Proper synthesis of RF signals for the filter let to suppress the intermodulation effects.

К настоящему времени установлено [1], что элементная база оптоэлектроники, включая акустооптику (АО), в принципе способна обеспечить перенос идеологии радиочастотной CDMA технологии в оптический диапазон. Отсутствие достаточной теоретической проработки ряда важных разделов АО, таких как, например, обеспечение заданных сочетаний спектральных составов света и звука с подавлением эффекта интермодуляционных искажений и т.п., до сих пор не позволяли создать проработанной полной структуры О-CDMA с использованием АО средств. Для таких систем, в первую очередь, необходима разработка оптических устройств спектрального кодирования и декодирования

оптического излучения, с учетом достаточно серьезного условия функционирования оптических некогерентных систем — монополярности используемых кодов. В качестве ключевых устройств для решения данной задачи могут служить многополосные акустооптические фильтры и светодиоды (LED). Однако, при многочастотном АО взаимодействии, в общем случае, возникают неприемлемые нелинейные искажения, связанные с интермодуляционными эффектами высших порядков.

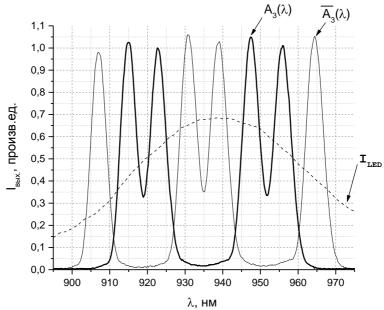


Рис. 1. Экспериментальная проверка эффективности выравнивания битов при кодировке 8-битной функции Уолша в АО кодере для одного из пользователей

Нами был предложен, построен и исследован экспериментальный кодер O-CDMA, построенный на базе MAOФ из TeO_2 со спектральным диапазоном 900-1600 нм, диапазоном управляющих частот 55-100 МГц, спектральным разрешением 2 нм на длине волны 1152 нм и промышленно выпускаемый светодиод TSAL6200 на GaAS/GaAlAs с центральной длинной волны 940 нм, излучаемой мощностью 210 мВт и углом расходимости $\pm 17^0$. Преимущества такого выбора заключаются не только в устранении эффекта дисперсионного искажения частотной сетки, свойственной волноводным AO структурам, но и в возможности

использования при такой геометрии известного алгоритма подавления механизма частотных интермодуляций [2].

При разработке АО кодера были использованы результаты расчетов пропускной способности рассматриваемой линии передачи данных приведены в работе [3], где для подобной же АО геометрии было проведено компьютерное моделирование и для аналогичных условий выявлена важная статистическая закономерность — оптимальное расстояние между соседними спектральными линиями передаваемых кодов, с точки зрения повышения вероятности принятия правильного решения, должно быть на уровне двух/трех кратного критерия Рэлея.

Выравнивание кодовых единиц во всей полосе сигналов было достигнуто путем оптимального синтеза многочастотного сигнала с подавлением интермодуляционных искажений в соответствии с [2], а подбор сетки частот осуществлялся с учетом отмеченной выше оптимальной плотности размещения соседних спектральных линий. На (наихудший показан результат ПО однородности) экспериментальной проверки эффективности выравнивания битов прямой и комплементарной последовательностей в АО кодере для одного из 5-и возможных пользователей при использовании для кодировки 8-битных функций Уолша (результаты измерений непрерывного спектра мощности излучения светодиода показаны пунктиром). Достигнутая однородность кодовых единиц (чипов) порядка 5% для данной системы вполне приемлема, ибо, как показали расчеты, при декодировании она не ухудшит ожидаемой максимальной скорости передачи данных для рассмотренной линии, построенной на современной элементной базе, которая в оптическом диапазоне, по оценке, может достигать величины ~ 5 10⁹ бит/сек.

Таким образом, из проведенного анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что предложенные в работе новые методы выравнивания спектральных элементов в кодовых последовательностях Уолша с подавлением интермодуляционных искажений в определенной геометрии МАОФ на базе TeO_2 в принципе могут обеспечить достаточно эффективную работу как АО кодера, так и всей предложенной O-CDMA системы.

Работа поддержана грантами РФФИ №12-07-00186-а и №13-02-00479-а.

- 1. Hinkov I., Hinkov V., Iversen K., Ziemann O. // Electronics Lett. 1995. V.31. N3. P.384-386.
- 2. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2008. Т.78. В.б. С.79-83.
- 3. Проклов В.В., Бышевский-Конопко О.А., Григорьевский В.И. // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №9. С.905–915.

В.С. ХОРКИН, В.Б. ВОЛОШИНОВ, Л.А. КУЛАКОВА¹, Г.А. КНЯЗЕВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова ¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРА

Приводятся результаты измерений оптических, акустических и акустооптических характеристик стекол, в состав которых входит теллур. В частности, исследованы твердые растворы соединений (Si-Se-Te), (Ge-Se-Te) и (Ge-Se-S-Te). Показана перспективность использования материалов для управления параметрами инфракрасных световых пучков.

V.S. KHORKIN, V.B. VOLOSHINOV, L.A. KULAKOVA¹, G.A. KNYAZEV

Lomonosov Moscow state university, Moscow

¹Ioffe physical-technical institute of the RAS, Saint-Petersburg

ACOUSTO-OPTIC CHARACTERISTICS OF TELLURIUM BASED GLASSES

We present results on measurements of optic, acoustic and acousto-optic characteristics of glasses including tellurium. In particular, the following solid-state solutions (Si-Se-Te), (Ge-Se-Te) and (Ge-Se-S-Te) were investigated. We demonstrated perspectives of the glasses application in control of parameters of infrared optic beams.

сообщении приводятся результаты измерений оптических, акустических и акустооптических характеристик стекол, в состав которых входит теллур, а также германий, кремний и селен. Аналогично кристаллическому теллуру, эти оптические материалы прозрачны в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне длин волн, обладают высоким коэффициентом акустооптического качества и представляют интерес для создания акустооптических устройств управления [1, 2]. характеристиками оптического излучения исследованы твердые растворы (Ge-Se-Te), (Ge-Se-S-Te) и (Ge-Si-Te), прозрачные на длинах волн от 1.5 мкм и до 20 мкм. Несмотря на то, что коэффициент акустооптического качества стекол несколько ниже, чем в кристаллическом теллуре, стекла привлекают внимание своей относительной дешевизной и слабой чувствительностью к поляризации света. Всё это делает исследованные материалы весьма перспективными для использования в акустооптике в инфракрасном диапазоне [2].

Измерения характеристик стекол проводились на длинах волн 3.39 мкм и 10.6 мкм при помощи гелий-неонового и углекислотного лазера. Измерялась скорость продольных акустических волн, фотоупругие константы, а также коэффициенты акустооптического качества материалов в зависимости от процентного содержания теллура. Кроме этого, были независимо проведены измерения диапазонов оптической прозрачности стекол, их показателей преломления и плотности. В качестве примера на рис. 1 показана измеренная зависимость скорости продольных акустических волн в стеклах от концентрации теллура в образцах, номера которых указаны на рис. 1.

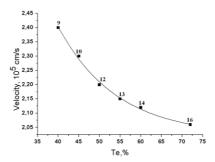


Рис. 1. Зависимость скорости акустических волн от концентрации теллура

Проведенные изменения доказывают, что увеличение концентрации теллура сопровождается убыванием скорости звука. В экспериментах также зарегистрирована зависимость показателей преломления, фотоупругих констант и плотности материалов от химического состава твердых растворов. Это позволило выбрать оптимальный химический состав стекол и оценить перспективность их использования в акустооптических приборах.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 14-12-00380.

- 1. Gupta N., Voloshinov V.B., Knyazev G.A., Kulakova L.A. // Journal of Optics. 2011. N14. P.035502-035511.
- 2. Кулакова Л.А., Мелех Б.Т., Грудинкин С.А., Данилов А.П. // Физика и техника полупроводников. 2013. Т.47. Вып.10. С.1435-1439.

А.А. ЕРМАКОВ, В.И. БАЛАКШИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ЛУЧЕВЫЕ СПЕКТРЫ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ ТЕЛЛУРА

Представлены результаты теоретического исследования распространения акустических пучков в кристалле теллура. Влияние акустической анизотропии на структуры акустических пучков изучалось на основе лучевых спектров. Численные расчёты выполнены для всех акустических мод, распространяющихся в трёх основных кристаллографических плоскостях кристалла теллура.

A.A. ERMAKOV, V.I. BALAKSHY

Lomonosov Moscow state university

ACOUSTIC RAY SPECTRA IN A TELLURIUM SINGLE CRYSTAL

Results of theoretical investigation of acoustic beam propagation in a tellurium single crystal are presented. The influence of acoustic anisotropy on the acoustic beam structure is studied on the basis of ray spectra. Numerical computations are fulfilled for all acoustic modes in the principal crystallographic planes.

Теллур отличается чрезвычайно высоким значением акустооптического качества и может рассматриваться как весьма перспективный материал для изготовления акустооптических устройств среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра [1]. Этот кристалл уникален также по анизотропии оптических и акустических свойств, что позволяет наблюдать в нем эффекты, отсутствующие в других кристаллах. Данная работа посвящена исследованию особенностей распространения в теллуре акустических пучков и эффектов их фокусировки, дефокусировки и автоколлимации, обусловленных акустической анизотропией кристалла.

Количественные расчеты выполнены для трёх акустических мод, распространяющихся в главных кристаллографических плоскостях. акустической Рассчитаны сноса энергии коэффициенты VГЛЫ анизотропии для разных направлений акустического пучка. Найдены которых коэффициент анизотропии диапазоны **УГЛОВ**, увеличивает расходимость (акустическая анизотропия сравнению с дифракционной) и $\kappa < 1$ (расходимость пучка меньше дифракционной). Особое внимание уделено направлениям, где кривизна поверхности медленностей меняет знак и имеет место эффект автоколлимации пучка. Например, для медленной моды в плоскости (100) есть три таких направления: под углом $\theta_0=13.47^\circ$ и $\theta_0=71.96^\circ$ с коллимацией пучка в плоскости (100) и под углом $\theta_0=59.25^\circ$ с коллимацией в плоскости, ортогональной (100). А в ортогональной плоскости расходимость пучка, благодаря акустической анизотропии, оказывается меньше дифракционной в обеих плоскостях главных кривизн (рис. 1).

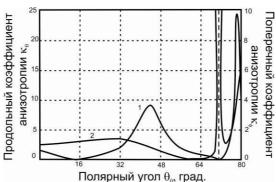


Рис.1. Зависимости коэффициента анизотропии в плоскости (100) (кривая 1) и в ортогональной плоскости (кривая 2) от полярного угла

Для описания влияния акустической анизотропии на расходимость акустического пучка введено понятие лучевого спектра, характеризующего угловое распределение потока акустической энергии [2, 3]. Показано, что лучевой спектр определяет структуру акустического пучка в дальней зоне дифракции. Выполнен расчет лучевых спектров для разных направлений распространения пучка в кристалле парателлурита. Лучевой спектр сохраняет свою форму везде, за исключением областей автоколлимации. В этих областях имеет место сильная деформация лучевого спектра с его инверсией.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 14-22-00042.

- 1. Балакший В.И., Волошинов В.Б., Князев Г.А., Кулакова Л.А. // ЖТФ. 2008. Т.78. №10. С.87-95.
 - 2. Балакший В.И., Манцевич С.Н. // Акуст. журнал. 2012. Т.58. №5. С.600-609.
 - 3. Балакший В.И., Ермаков А.А., Манцевич С.Н. // ФОП. 2013. Т.2. №2. С.70-81.

В.Я. МОЛЧАНОВ, С.И. ЧИЖИКОВ, К.Б. ЮШКОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ МЕТОЛАМИ АКУСТООПТИКИ

Рассмотрен метод формирования лазерных пучков с плоским пространственным профилем, использующий изотропную акустооптическую дифракцию Брэгга.

V.Ya. MOLCHANOV, S.I. CHIZHIKOV, K.B. YUSHKOV

National university of science and technology "MISIS", Moscow

SPATIAL SHAPING OF LASER BEAMS BY MEANS OF ACOUSTO-OPTICS

We report a method for flat-top spatial shaping of laser beams using isotropic acousto-optic diffraction in Bragg regime.

Управление поперечным сечением лазерных пучков является одной из острых проблем при создании лазерных систем сверхвысокой мощности. Одним из распространенных способов решения данной задачи является использование «мягких» диафрагм [1, 2]. Традиционно «мягкие» диафрагмы исполнены в виде амплитудных масок, подавляющих дифракцию пучков на краях. Такой принцип устройства существенно ограничивает адаптивность «мягких» диафрагм.

В данной работе нами предложен новый метод формирования лазерных пучков с «плоской вершиной» — равномерно распределенной интенсивностью, — основанный на акустооптическом (АО) взаимодействии в брэгговском режиме. В основе метода лежит преобразование углового спектра плоских волн электромагнитных волн, имеющее место при изотропной АО дифракции брэгга.

Дифракция расходящихся лазерных пучков на расходящемся ультразвуке в приближении сильного поля (при высокой эффективности дифракции) была изучена в работе [3]. В соответствии с полученными результатами, распределение дифрагировавшего поля $E^d(x,z)$ можно представить как

$$E^{d}(x,z) = \frac{\pi}{\lambda} E_{2}^{0}(z) \int_{-\infty}^{\infty} E_{1}^{0}(x-x') J_{0}\left(2\pi \frac{w}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{L\lambda}{2\Lambda}\right)^{2}-x'^{2}}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{\Lambda}{L\lambda}x'\right) dx, \tag{1}$$

где $E^0(x,z) = E_1^0(x) E_2^0(z)$ — пространственное распределение поля входного лазерного пучка вдоль ортогональных координат х и z; W — параметр ультразвуковой мощности; λ и Λ — длины волн света и ультразвука соответственно; L — длина AO взаимодействия.

Для гауссова распределения входного лазерного с радиусом перетяжки $\mathbf{w}_{\mathbf{0}}$, уравнение (1) можно проинтегрировать аналитически в приближении слабого поля. Результат имеет вид

$$E^d(x, z) \sim \exp\left(-\frac{z^2}{w_0^2}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x}{w_0} + a\frac{\pi}{4}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{w_0} - a\frac{\pi}{4}\right)\right]$$
(2)

где $a = 2\lambda L/(\pi w_0 \Lambda)$. В соответствии с выражением (2), дифрагировавшее поле имеет плоское распределение интенсивности вдоль плоскости АО взаимодействия и остается гауссовым в ортогональном направлении. Таким образом, АО ячейка Брэгга может рассматриваться как одномерная

«мягкая» диафрагма. Ширина склона распределения поля $E^d(x,z)$ вдоль оси x определяется параметром а. Для формирования двумерного прямоугольного распределения интенсивности можно использовать двухкоординатную ячейку Брэгга.

AO взаимодействии слабом поле, угловой дифрагировавшего поля является произведением углового спектра падающего поля и углового спектра ультразвука. В результате, угловой спектр дифрагировавшего поля всегда более узкий, чем угловой спектр падающего поля. В этом заключается принципиальное различие с дифракцией света на отверстии, при котором угловой спектр всегда уширяется. Таким образом, управление спектральными компонентами ультразвукового поля позволяет влиять пространственное на распределение дифрагировавшего электромагнитного поля.

Для экспериментальных исследований АО ячейка Брэгга была сконструирована и изготовлена из тяжелого флинта. Эксперименты были проведены для одночастотного излучения лазера на Nd:YAG с удвоением частоты на ллине волны 532 HM. Измеренное распределение интенсивности дифрагировавшего электромагнитного поля соответствовало теоретическим расчетам.

- 1. Красюк И.К., Лукишова С.Г., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Ширков А.В. // Квантовая электроника. 1976. Т.6. С.725.
 - 2. Vinogradsky M., Kargin V.A., Sobolev S.K., et. al. // Proc. SPIE. 2000. V.3889. P.849.
 - 3. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. // Оптика и спектроскопия. 1977. Т.42. С.533.

Л.И. БУРМАК, А.В. ВИСКОВАТЫХ, А.С. МАЧИХИН, В.Э. ПОЖАР

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

МИКРОВИДЕОСПЕКТРОМЕТР-ПРОФИЛОМЕТР НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Предложена схема микровидеоспектрометра-профилометра полного поля на основе акустооптической фильтрации интерферирующих пучков в приемном канале. Схема позволяет сочетать в одной установке функции трех приборов: профилометра, спектральной видеокамеры, цветной видеокамеры.

L.I. BURMAK, A.V. VISKOVATYKH, A.S. MACHIKHIN, V.E. POZHAR

Scientific and technological center of unique instrumentation of the RAS, Moscow

MICROIMAGING SPECTROMETER AND PROFILOMETER BASED ON ACOUSTO-OPTIC FILTRATION

A scheme of microimaging spectrometer-profilometer based on the spectral selection of interfering beams by an acousto-optic tunable filter in registration channel is proposed. It combines three devices: profilometer, spectral videocamera, RGB camera.

Оптические профилометры, как правило, строятся базе интерференционных схем, применяемых в оптической когерентной микроскопии (ОКМ) [1-4]. Метод ОКМ с регистрацией в спектральной области (СО) более чувствителен по сравнению с методом ОКМ с регистрацией во временной области и обеспечивает более высокую скорость сканирования. В этом случае регистрируется отраженное и рассеянное объектом излучение на различных длинах волн, а профиль образца вычисляется путем преобразования Фурье от полученной спектральной зависимости сигнала. Зависимость от длины волны обычно определяется путем узкополосной селекции спектра широкополосного источника с помощью перестраиваемого спектрального элемента.

На практике часто встречаются задачи, в которых, помимо измерения геометрических параметров объекта, необходимо проводить другие виды исследований. Например, требуется выделить области с различными физико-химическими свойствами. Это можно осуществить методом видеоспектрометрии, т.е. путем регистрации изображений в узких спектральных интервалах. Таким образом, профилометрия и

спектрометрия дают разную информацию об объекте и дополняют друг друга. При последовательном исследовании объекта на двух разных установках не всегда удается осуществить однозначную привязку данных, что снижает эффективность такого двойного анализа. Кроме того, состояние объекта за время перемещения может измениться, поэтому задачи исследования нестационарных объектов и переходных процессов в них представляют определенную трудность.

В работе описана разработанная схема микровидеоспектрометрапрофилометра, позволяющая решить указанные проблемы. Схема построена на базе интерферометра Майкельсона и использует методы ОКМ СО полного поля за счет спектральной фильтрации излучения широкополосного источника с помощью перестраиваемого акустооптического (АО) фильтра, установленного в приемном канале [5]. Это требует сохранения картины интерференции световых пучков после дифракции на объемной акустической решетке в пределах всего поля зрения.

В отличие от известных схем, где спектральный элемент расположен в осветительной ветви, в предлагаемой схеме он помещен в приемный канал и обеспечивает одновременную спектральную фильтрацию двух интерферирующих пучков, переносящих изображения. Это позволяет в установке реализовать различных три типа измерений: 1) регистрация пространственного распределения интенсивности отраженного излучения в трех цветах $I_o(x,y)$; 2) регистрация спектральных $I (x,y,\lambda)$; изображений 3) измерение трехмерного распределения интенсивности I(x,y,z).

Экспериментальные исследования показали, что дифракция двух интерферирующих световых пучков на объемной решетке, созданной бегущей акустической волной, не нарушает их когерентности, и продемонстрировали эффективность описанной схемы в решении задач восстановления микрорельефа объектов [5].

- 1. Stojanovic R., Koubias S., Stojanovic S., Georgoudakis M. // Proc. SPIE. 2002. V.4827. P.553-563.
- 2. Mehta D., Anna T., Shakher C. // Journal of the Optical Society of Korea. 2009. V.13. N_2 3. P.341-348.
- 3. Liu H., Bailleul J., Simon B., Debailleul M., Colicchio B., Haeberlé O. // Applied Optics. 2014. V.53. №4. P.748-755.
- 4. Mehta D., Saito S., Hinosugi H., Takeda M., Kurokawa T. // Applied Optics. 2003. V.42. №7. P.1296-1305.
- 5. Висковатых А.В., Мачихин А.С., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Висковатых Д.А. // Письма ЖТФ. 2013. Т.40. Вып.4. С.33-41.

М.И. КУПРЕЙЧИК, В.И. БАЛАКШИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДВУОСНОМ КРИСТАЛЛЕ ЙОДНОВАТОЙ КИСЛОТЫ

Детально исследованы акустические и акустооптические свойства двуосного кристалла йодноватой кислоты. На основе разработанных оригинальных компьютерных программ выполнен расчет частотных зависимостей угла Брэгга и коэффициентов акустооптического качества для различных направлений распространения акустических и оптических волн в кристалле.

M.I. KUPREYCHIK, V.I. BALAKSHY

Lomonosov Moscow state university

SPATIAL STRUCTURE OF ACOUSTO-OPTIC INTERACTION IN BIAXIAL CRYSTAL ALPHA-IODIC ACID

Acoustic and acousto-optic properties of a biaxial crystal alpha-iodic acid are studied in detail. On the basis of developed original programs, calculations of Bragg angle frequency dependences and acousto-optic figure of merit are fulfilled for different directions of acoustic and optical waves propagation in the crystal.

В настоящее время при конструировании акустооптических устройств случаев подавляющем большинстве В качестве среды распространения акустической волны используются одноосные кристаллы [1]. Однако двуосные кристаллы, несмотря на их расчётную сложность, также демонстрируют высокие значения акустооптического качества, что делает перспективным изучение их свойств. К числу таких кристаллов относится йодноватая кислота (α-HIO₃), которая является предметом исследования в настоящей работе. Кристалл обладает высокими значениями акустооптического качества, превосходя по этому показателю плавленый кварц в десятки раз, а ниобат лития в несколько pa3 [1, 2].

Акустические и акустооптические свойства кристалла исследованы только для направлений по кристаллографическим осям. Поэтому нашей задачей являлось всестороннее изучение данного кристалла и поиск оптимальных срезов для изготовления акустооптических приборов. Анализ показал, что в целом кристалл характеризуется умеренной

анизотропией акустических свойств, что следует рассматривать как положительное свойство с точки зрения практического использования.

В акустооптике одним из главных параметров является угол Брэгга, определяющий угол падения светового пучка на фронт акустической волны, при котором выполняется условие фазового синхронизма, и эффективность дифракции достигает максимума. Была разработана оригинальная программа расчета зависимости углов Брэгга от частоты ультразвука для любых срезов двуосных кристаллов, позволяющая получать угло-частотные характеристики как для изотропной дифракции (с сохранением типа оптической моды), так и для анизотропной дифракции (со сменой оптической моды). Наиболее интересные результаты получены, когда плоскость акустооптического взаимодействия содержит обе оптические оси или образует с ними малые углы. случаях реализуются варианты такие геометрии взаимодействия, которые принципе В невозможны одноосных кристаллах [3]. Особенно интересным оказался вариант, направление ультразвука почти перпендикулярно к одной из оптических осей, а падающий и дифрагированный световые пучки распространяются вблизи оптических осей. В этом случае кривые частотной зависимости угла Брэгга сильно деформируются. Появляются области частот, удобные для создания широкоопертурных фильтров и дефлекторов.

Поскольку реальные акустооптические устройства работают со световым излучением конечного пространственного спектра, большую роль играет расчет дифракции не только при точном выполнении условия фазового синхронизма, но и при небольшой расстройке. Для расчета коэффициента акустооптического качества M была создана программа, позволяющая находить значения M для любых направлений распространения света и звука в двуосном кристалле. Полученные результаты свидетельствует о перспективности применения двуосного кристалла йодноватой кислоты в оптоэлектронных устройствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 14-12-00380.

- 1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
 - 2. Pinnow D.A., Dixon R.W. // Appl. Phys. Lett. 1968. V.13. №4. P.156-158.
- 3. Купрейчик М.И. // Труды 7-й Международной конф. "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации". Суздаль, 2014. С.180-183.

Э.А. МАНЫКИН^{1,2}, Е.В. МЕЛЬНИЧЕНКО¹

 1 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 2 Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

АНАЛИЗ СВОЙСТВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КВАНТОВОМ ПРОЦЕССИНГЕ

На основе ионов редкоземельных элементов рассматривается оптических реализация квантовых логических вентилей. Такие квантовые логические элементы могут быть использованы для построения масштабируемого квантового компьютера на основе фотонного эха.

E.A. MANYKIN^{1,2}, E.V. MELNICHENKO¹

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)
²National research center "Kurchatov Institute", Moscow

RARE-EARTH ELEMENTS PROPERTIES ANALYSIS FOR QUANTUM PROCESSING APPLICATION

Realization of quantum logic elements on the base of rare-earth elements is discussed. Such quantum logic elements could be used to yield scalable quantum computer on the base of photon echo phenomena.

К настоящему моменту известно много вариантов применения фотонного эха (ФЭ) в различных экспериментах в области квантовых вычислений. На основе ФЭ строятся такие устройства как квантовая память, применяемая как для квантового процессинга, так и для квантовых коммуникаций [1]. В такого рода устройствах роль кубита выполняют ионы редкоземельных элементов (РЗ), пары щелочных металлов, или мезоскопические квантовые объекты, как правило удерживаемые в магнитооптической ловушке, микрорезонаторе или же внедренные в кристаллическую матрицу. Управление квантовым состоянием кубита часто осуществляется не одним полем, а комбинацией различных видов полей: магнитного, микроволнового или оптического диапазонов.

Помимо магнитных свойств, широкий набор уровней РЗ ионов позволяет использовать их не только как кубиты, но как передающее звено между «летящими» кубитами (фотонами) и сверхпроводящими кубитами. Возможность передачи информации между имеющим большое время когерентности и позволяющих устанавливать высокую степень

сверхпроводящими кубитами И фотонами перепутывания телекомовскими частотами позволяет совмещать различные блоки для квантовых вычислений и квантовых коммуникаций[2]. Возможность передавать квантовое состояние от большого количества фотонов на атомный ансамбль показана на примере кристалла YVO₄, допированного ионами Nd [3] с эффективностью хранения до 35% и временем 20мкс, что дает возможность сопрягать квантовую память и квантовый регистр, производящий вычисления. Возможности использования других РЗ элементов в качестве кубитов определяются, в основном, временем жизни возбужденного состояния и удобством использования частоты перехода. Так, в дополнение к известным и широко используемым Рг и Еи исследован переход 4f - 5d в Ce $^{3+}$: Y_2SiO_5 [4]. Исследование когерентных свойств Се как физического носителя кубита показало возможность выполнения обработки информации только оптическим способом [5].

Современные протоколы приложений $\Phi \Im$ для квантовой памяти призваны максимально задействовать преимущество оптической обработки информации. Так, для исследования свойств оптической когерентности, определяющих пригодность для квантовой обработки информации, допированного кристалла 1% Tm $^{3+}$: Y $_3$ Ga $_5$ O $_{12}$ (Tm:YGG) на переходе 3 H $_6$ - 3 H $_4$ использовалась техника $\Phi \Im$ и выжигания спектральных провалов. Для исследуемого материала определено время оптической когерентности: до 1мкс при температуре 1К, что дает возможность его применения для оптической обработки информации и квантовой памяти [6]. Эти и другие эксперименты подтверждают возможность использовать свойства редкоземельных элементов для выполнения с их помощью квантовых вычислений.

Наиболее эффективной представляется организация оптических квантовых вычислений, основанных на измерении (MQC), к которым относится и однонаправленный квантовый компьютер [7].

- 1. Маныкин Э.А., Мельниченко Е.В. // Изв.РАН. Сер. Физ. 2004. Т.68. №9. С.1256-1259.
- 2. O'Brien Ch., Lauk N., Blum S., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V.113. P.063603.
- 3. Usmani I., Afzelius M., Gisin N., et al. // Nature.Comm. 2010. DOI:10.1038/ncomms1010.
- 4. Yan Y., Karlsson J., Rippe L., et. al. // Physical Review B. 2013. V.87. P.184205.
- 5. Siyushev P., Xia K., Reuter R., et. al. // Nature.Comm. 2014. DOI: 10.1038/ncomms4895.
- 6. Thiel C.W., Sinclair N., Tittel W., et. al. // arXiv.org:1410.6096. 2014.
- 7. Monroe C., Raussendorf R., Ruthven A., et. al. // Phys.Rev. A. 2014. V.89. I.2. P.022317.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ, А.В. ТРОФИМОВА, Ал.Ан. МУРАВСКИЙ 1 , Ан.Ал. МУРАВСКИЙ 1

Белорусский государственный университет, Минск ¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ЖК МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены особенности ориентации жидкокристаллических (ЖК) материалов слоями фотосшиваемых полимеров с бензальдегидными боковыми группами. Проведено исследование механизма фотостимулированной ориентации после натирания бензальдегидного слоя и описаны способы формирования многодоменных ориентирующих слоев.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH, A.V. TROFIMOVA, Al.An. MURAVSKY¹, An.Al. MURAVSKI¹

Belarusian state university, Minsk

¹Institute of chemistry of new materials of NAS of Belarus, Minsk

PHOTOSENSITIVE POLYMERS FOR ALIGNMENT OF LC MATERIALS

The peculiarities of alignment of liquid crystal (LC) materials by the layers of photocrosslinkable polymers with side benzaldehyde groups are considered. The investigation of mechanism of photostimulated alignment by rubbed benzaldehyde layer is performed. The methods of creation of multidomain aligning layers are described.

В настоящей работе обобщена полученная нами информация и развитые на ее основе представления об ориентирующих свойствах полимеров с бензальдегидными группами в боковой цепи. Одно из фоточувствительности основных проявлений этих полимеров эффективное сшивание благодаря фотоприсоединению бензальдегидных групп к макромолекулам. Под действием линейно-поляризованного УФизлучения также демонстрируют фотонаведенное двулучепреломление [1] и эффект фотоориентации ЖК [2]. Последняя характеризуется азимутальной энергией сцепления на уровне ~ 10⁻⁵ Дж/м² направлением оси анизотропии вдоль электрического вектора активирующего излучения. Значительно большей энергии сцепления удается достигнуть, натирая слой бензальдегидного полимера и сшивая его затем неполяризованным или поляризованным УФ-излучением [3].

Проведено фотостимулированной исследование механизма ориентации после натирания бензальдегидного слоя. Нарастание параметра качества ориентации коррелирует с ростом степени сшитости полимера, а не с глубиной фотоконверсии бензальдегидных групп, как это наблюдается при фотоориентации. Директор отвержденного ЖК слоя на натертом и облученном ориентанте обычно параллелен направлению натирания (положительная ориентация). После тепловой деградации поверхностной анизотропии, наведенной натиранием, удается наблюдать ее конкуренцию с фотоориентацией, развивающейся при более глубокой бензальдегидных Линейно-поляризованное фотоконверсии групп. облучение с электрическим вектором, перпендикулярным направлению натирания, сопровождается переходом от положительной ориентации к отрицательной. Это указывает на приблизительную перпендикулярность осей анизотропии ансамблей частиц, создаваемых натиранием поляризованным облучением. За фоториентацию ответственны фотопродукты боковых бензальдегидных групп, натирание ориентирует участки основных полимерных цепей. Они и служат источником анизотропных межмолекулярных взаимодействий, ориентирующих ЖК.

Азимутальная энергия сцепления ЖК с натертой поверхностью слоя бензальдегидного полимера увеличивается с УФ-экспозицией, благодаря, предположительно, нарастающему по мере сшивания анизотропному сжатию приповерхностной области ориентирующего слоя. Изменение соотношения азимутальной и полярной энергий позволяет управлять углом преднаклона ЖК [4]. Потеря растворимости материала при фотосшивании позволяет задавать локально-неоднородное направление директора на поверхности полимерных нанорельефов, которые формируются нанесением, натиранием, облучением через фотомаску и проявлением дополнительных полимерных слоев. Ориентацию в таких структурах осуществляют открытые участки поверхности каждого слоя.

Показано, что при фотосшивании возникает устойчивость полимера к повторному натиранию в ином направлении с последующим УФоблучением. Это дает возможность создавать многодоменные ориентирующие поверхности без операций нанесения и проявления дополнительных слоев.

- 1. Mahilny U.V., Trofimova A.V. // J. Opt. 2011. V.13. №10. P.105601.
- 2. Trofimova A.V., Mahilny U.V. // JOSA B. 2014. V.31. Is.5. P.948-952.
- 3. Mahilny U.V., Stankevich A.I., et. al. // J. Phys. D: Appl.Phys. 2009. V.42. P.075303.
- 4. Ho J.Y.L., Chigrinov V.G., Kwok H.S. // Appl. Phys. Lett. 2007. V.90. P.243506.

Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ НИОБАТА ЛИТИЯ С НИЗКИМ ЭФФЕКТОМ ФОТОРЕФРАКЦИИ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

Доклад посвящен фундаментальным аспектам получения монокристаллов $LiNbO_3$, номинально чистых (с разным отношением Li/Nb) и легированных «нефоторефрактивными» катионами Mg^{2+} , Zn^{2+} , Y^{3+} и др. в широком диапазоне легирующей примеси, обладающих высокой оптической однородностью и низким эффектом фоторефракции, а также комплексному исследованию в них дефектов (включая лазерно-индуцированные дефекты), оптических, фоторефрактивных и структурных характеристик, оптической и структурной однородности методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, полнопрофильного рентгеноструктурного анализа, диэлектрической и электронной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии, лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света.

N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

I.V. Tananaev institute of chemistry and technology of rare elements and mineral raw materials of Kola science center of the RAS, Apatity

NONLINEAR OPTICAL CRYSTALS OF LITHIUM NIOBATE WITH LOW PHOTOREFRACTION EFFECT: SYNTHESIS, STRUCTURE, PROPERTIES

The report is dedicated to the fundamental aspects of obtaining of LiNbO₃ single crystals – both pure (with different Li/Nb ratio) and doped by non-photorefractive cations Mg²⁺, Zn²⁺, Y³⁺ etc. in wide range of concentrations. The crystals are highly homogeneous, with low photorefraction effect. Also the complex research of defects (including laser-induced) in the crystals, their optical, photorefractive, structure characteristics by Raman spectra, full profile X-ray analysis dielectric and electronic spectroscopy, atomic force microscopy, laser conoscopy, photo-induced light scattering is discussed

R настояшее время актуальными являются исследования, целенаправленное направленные на оптимизацию структуры И фоторефрактивных свойств нелинейно-оптического формирование кристалла ниобата лития (LiNbO₃). Особую роль в формировании оптических характеристик материалов на основе кристалла LiNbO₃ играют собственные и примесные дефекты, микро- и наноструктуры с локализованными электронами, а также дефекты, наведенные лазерным излучением. Доклад посвящен фундаментальным аспектам получения монокристаллов LiNbO₃, номинально чистых (с разным отношением Li/Nb) и легированных «нефоторефрактивными» катионами Mg^{2+} Zn^{2+} и др. в широком диапазоне легирующей примеси, обладающих высокой оптической однородностью и низким эффектом фоторефракции, а также комплексному исследованию в них дефектов (включая лазерноиндуцированные дефекты), фоторефрактивных оптических, структурных характеристик, оптической и структурной однородности методами спектроскопии комбинационного рассеяния света полнопрофильного рентгеноструктурного (PCA), анализа диэлектрической И электронной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии, лазерной коноскопии и фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС). Существенное внимание уделено экспериментальному обнаружению монокристаллах И исследованиям условий целенаправленного формирования структурных микронеоднороднестей с локализованными на них электронами, определяющих нелинейно-оптических и фоторефрактивных характеристик материалов. Изложены результаты исследования тонких особенностей структуры монокристаллов и структуры шихты и ее основных компонентов в зависимости от условий синтеза. При этом внимание уделено разработке фундаментальные научных основ технологии монокристаллов ниобата лития высокого оптического качества, с предельно низким эффектом фоторефракции, пригодных в качестве материалов для эффективного преобразования когерентного и широкополосного излучений. Для кристаллов LiNbO₃ разного состава определены фотоэлектрические поля и картины ФИРС. кинетика раскрытия определяющие быстродействие оптических элементов в электрооптических модуляторах и затворах. Получены монокристаллы LiNbO₃:Y LiNbO₃:Y:Mg, для которых раскрытие индикатрисы спекл-картины ФИРС происходит очень быстро, в течение первой секунды облучения их лазерным излучением, что потенциально ставит данные кристаллы в ряд перспективных материалов для голографии, электрооптических модуляторов и затворов.

Е.В. СТРОГАНОВА, К.В. СУДАРИКОВ, Д.А. РАСЕЙКИН, В.В. ГАЛУЦКИЙ

Кубанский государственный университет, Краснодар

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОРЕФРАКЦИИ ГРАДИЕНТНЫХ КРИСТАЛЛОВ LINBO₃ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1053 нм

Разработана методика исследования фоторефракции в градиентных кристаллах ${\rm LiNbO_3}.$

E.V. STROGANOVA, K.V. SUDARIKOV, D.A. RASSEYKIN, V.V. GALUTSKIY

Kuban state university, Krasnodar

RESEARCH OF A PHOTOREFRACTION OF GRADIENT CRYSTALS OF LINBO₃ ON THE WAVELENGTH of 1053 nm

The technique of researches of a photorefraction in gradient crystals is developed $LiNbO_3$.

Представлена методика анализа динамики изменения фоторефрактивного пятна на поверхности градиентных кристаллов. Схема стенда представлена на рис. 1.

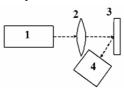


Рис. 1. Схема стенда: 1 - твердотельный лазер (мощность 2Вт, длина волны 1053нм, частота импульсов 10 нс); 2 - собирающая линза в устройстве крепления; 3 - кристалл LiNbO $_3$, закрепленный на наклонном столике; 4 - веб-камера Logitech C525 (разрешение (видео)-1280x720 пикс)

Процесс фоторефракции кристалла LiNbO3 (по схеме 1) записывался на видеосъемку, посредством веб-камеры Logitech C525. Полученные результаты в виде *.wmv файла, обрабатывались в программах (KMPlayer, Paint и MatLab IPT). Алгоритм обработки и анализа полученных результатов состоит из следующих этапов: 1) раскадровка видеозаписи (длительность видео вырезки составила 2 секунды); 2) обработка области

фоторефракции кристалла в программе MatLab IPT. Область фоторефракции на кристалле при помощи программы MatLabIPT переводится в изображение бинарного вида. В качественной границе фоторефракции суммируем «белые» пиксели и определяем относительную площадь пятна фоторефракции.

Программа MatLab суммирует «белые» пиксели и выводит нам конечный результат в виде графика зависимости площади пятна фоторефракции от времени облучения кристалла. Данная зависимость анализируется и определяется площадь фоторефрактивного пятна и время процесса.

На рис. 2 представлена зависимость площади пятна фоторефракции от поглощенной энергии с корреляцией изменения концентраций примеси по длине кристалла.

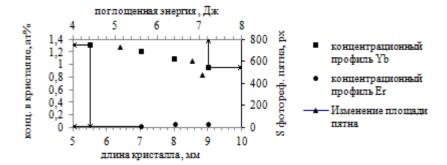


Рис. 2. Иллюстрация зависимости площади фоторефрактивного пятна от поглощенной энергии в градиентно активированном кристалле

Разработанная методика может использоваться для исследования лучевой стойкости кристаллов $LiNbO_3$ с градиентом концентраций оптических центров вдоль оси роста и позволяет обрабатывать и анализировать большие массивы данных.

В.Г. ДЮ, Е.С. ХУДЯКОВА, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ, Ю.Ф. КАРГИН 1

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники ¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИМЕСНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ СИЛЛЕНИТОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей оптического поглощения в нелегированных кристаллах германата и силиката висмута, и в легированном алюминием кристалле титаната висмута, подвергнутых различным воздействиям (облучение лазерным излучением с длинами волн 532, 655 и 1064 нм; отжиг в воздушной атмосфере при температурах 200-370 °C).

V.G. DYU, E.S. KHUDYAKOVA, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV, Yu.F. KARGIN¹

Tomsk state university of control systems and radioelectronics ¹Baikov institute of metallurgy and material sciences of the RAS, Moscow

SPECTRAL DEPENDENCES OF IMPURITY OPTICAL ABSORPTION IN SILLENIT-TYPE CRYSTALS

We experimentally investigated the spectral dependences of the optical absorption in undoped bismuth germanium and bismuth silicon oxide crystals as well as in aluminum doped bismuth titanium oxide crystal, which was subjected to various actions (laser irradiation with wavelengths of 532, 655, and 1064 nm; air annealing at temperatures from 200 to 370 °C).

Засветка оптическим излучением и термический отжиг кристаллов силленитов, используемых в динамической голографии, изменяет их спектры оптического поглощения и фоторефрактивные параметры [1, 2].

В настоящем сообщении представлены результаты исследования спектральных зависимостей оптического поглощения в диапазоне 400-1000 нм в нелегированных кристаллах $\mathrm{Bi}_{12}\mathrm{SiO}_{20}$ и $\mathrm{Bi}_{12}\mathrm{GeO}_{20}$ и в легированном алюминием кристалле $\mathrm{Bi}_{12}\mathrm{TiO}_{20}$ (BTO:Al), подвергнутых воздействию как лазерной засветки с длинами волн 532, 655 и 1064 нм, так отжигу в воздушной атмосфере при температурах от 200 до 370 °C.

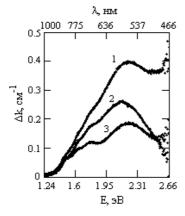


Рис. 1. Спектральные зависимости изменений в коэффициенте поглощения в образце BTO:Al после засветки: $1 - \lambda = 655$ нм, доза 17 Дж/см²;

 $1 - \lambda = 655$ нм, доза 17 Дж/см²; $2 - \lambda = 655$ нм, доза 109 Дж/см²; $3 - \lambda = 1064$ нм, доза 391 Дж/см²

Проведенные экспериментальные исследования позволили зафиксировать спектры с минимальными и максимальными значениями коэффициентов поглощения. На рис. 1 представлены спектральные характеристики изменений в оптическом поглощении $\Delta k(\lambda)$, полученные для образца BTO:Al в результате воздействия на него непрерывного $(\lambda = 655 \text{ нм}, \text{ зависимости } 1 \text{ и } 2)$ и импульсного (1064 нм, зависимость 3) лазерного излучения с различающимися дозами. Кривые демонстрируют резонансный характер с максимумами на длинах волн 577, 708, 762 и 822 нм. Показано, что путем варьирования используемыми воздействиями удается реализовать эксперименты, из результатов которых может быть выделен вклад в примесное поглощение, связанный преимущественно с фотовозбуждением электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров [1], или с внутрицентровыми переходами [2]. Спектральные зависимости оптического поглощения аппроксимировались в рамках модели примесного поглощения, учитывающей вклад этих процессов [1, 2], а также краевого поглощения, подчиняющегося правилу **Урбаха** [3].

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ № 2014/225 (проект № 2491) и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

- 1. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю., Кистенева М.Г., Шандаров С.М., Иткин С.И., Мандель А.Е., Каргин Ю.Ф., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. Спектральная зависимость фотоиндуцированного поглощения, наведенного в кристалле $\mathrm{Bi}_{12}\mathrm{TiO}_{20}$ импульсным излучением с длиной волны 532 нм // Квантовая электроника. 2007. Т.37. №11. С.1027–1032.
- 2. Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Shandarov S.M., Smirnov S.V. Photo- and thermoinduced changes of the optical absorption in Bi₁₂SiO₂₀ crystals // J.of holography and specle. 2009. V.5. P.1-6.
 - 3. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.

В.Д. АНЦЫГИН, А.А. МАМРАШЕВ, Н.А. НИКОЛАЕВ, О.И. ПОТАТУРКИН

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

АНИЗОТРОПИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ КТР

Впервые экспериментально исследованы оптические свойства нелинейнооптических кристаллов титанил-фосфата калия (КТР) в частотном диапазоне 0.2-2.6 ТГц методом импульсной терагерцовой спектроскопии. Обнаружены линии поглощения, обусловленные внешними колебаниями ионов калия относительно кристаллического каркаса, образованного TiO_6 и PO_4 . Установлена связь особенностей линий поглощения в кристаллах с различной проводимостью с наличием дополнительных позиций калиевой подрешетки и степенью их заполнения ионами калия

V.D. ANTSYGIN, A.A. MAMRASHEV, N.A. NIKOLAEV, O.I. POTATURKIN

Institute of automation and electrometry SB RAS, Novosibirsk

TERAHERTZ OPTICAL PROPERTIES ANISOTROPY AND STRUCTURAL PECULIARITIES OF KTP CRYSTALS

For the first time, optical properties of nonlinear optical crystals of potassium titanylphosphate (KTP) in the frequency range of 0.2 to 2.6 THz were experimentally studied by the method of terahertz time-domain spectroscopy. We observed absorption lines attributed to potassium ions oscillations external to the basic crystalline structure formed by ${\rm TiO_6}$ and ${\rm PO_4}$. The peculiarities of the absorption lines of crystals with different conductivity were determined to be associated with the degree of structural disorder of potassium sublattice i.e. with the presence of additional positions and degree of their occupation by potassium ions.

Оптические свойства кристаллов КТР исследованы на импульсном терагерцовом спектрометре, созданном на базе эрбиевого волоконного лазера ($\lambda=775$ нм, длительность импульса ~ 100 фс) [1]. Спектральный диапазон прибора 0,1-2,5 ТГц, динамический диапазон ~ 60 дБ. Генерация ТГц излучения осуществляется в фотопроводящей антенне, регистрация реализована поляризационно-оптическим методом в кристалле ZnTe.

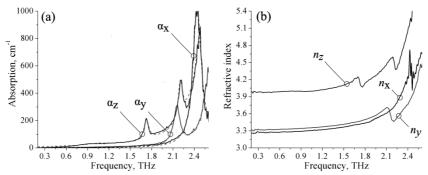


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов поглощения (a) и показателей преломления (b) кристалла КТР (σ_2) вдоль кристаллографических осей

Исследования проведены вдоль основных кристаллографических осей на образцах КТР с различной проводимостью ($\sigma_1 < 10^{-12}\,\mathrm{Om^{-1}cm^{-1}}$, $\sigma_2 \approx 10^{-11}\,\mathrm{Om^{-1}cm^{-1}}$ и $\sigma_3 = 2\cdot 10^{-6}\,\mathrm{Om^{-1}cm^{-1}}$). Все монокристаллы КТР выращены из растворов-расплавов методом Чохральского. Образцы имеют размеры $10\times 10\,\mathrm{mm^2}$ и толщину $0,1-0,5\,\mathrm{mm}$. Определение показателей преломления $n(\lambda)$ и коэффициентов поглощения $\alpha(\lambda)$ осуществлялось численными методами по времени задержки и амплитуде пропускания образцов (Рис. 1).

Анализ и сравнение полученных данных с имеющимися в литературе сведениями, полученными методом комбинационного рассеяния света, показывают связь линий поглощения с внешними колебаниями ионов калия относительно кристаллического каркаса, образованного октаэдрами ${\rm TiO_6}$ и тетраэдрами ${\rm PO_4}.{\rm Yc}$ становлена связь особенностей линий поглощения в кристаллах с наличием дополнительных вакансий в калиевой подрешетке и степенью их заполнения ионами калия [2]. Показано, что кристаллы КТР могут быть эффективны для генерации терагерцового излучения в диапазоне 0.2-1 ТГц.

- 1. Анцыгин В.Д., Мамрашев А.А., Николаев Н.А., Потатуркин О.И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // Автометрия. 2010. Т.46. №3. С.110-116.
- 2. Antsygin V.D., Kaplun A.B., Mamrashev A.A., et. al. Terahertz optical properties of potassium titanyl phosphate crystals // Optics Express. 2014. V.22. No.21. P.25436–25443.

М.В. ЧУМАНОВ 1,2 , И.А. ПАРГАЧЁВ 1,2 , Л.Я. СЕРЕБРЕННИКОВ 1,2 , В.А. КРАКОВСКИЙ 2 , М.А. ТАГИЛЬЦЕВА 1 К.О. КРЫМЦЕВА 1

 1 Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники ^{2}OOO «Кристалл Т», Томск

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ RKTP

Рассматривается применение нелинейно-оптического кристалла RKTP в устройствах управления и преобразования лазерного излучения. Приводятся результаты проверки технических параметров электрооптических затворов и устройства для генерации второй гармоники, результаты экспериментальных исследований акустооптических характеристик кристалла RKTP.

M.V. CHUMANOV^{1,2}, I.A. PARGACHEV^{1,2}, L.Y. SEREBRENNIKOV^{1,2}, V.A. KRAKOVSKY², M.A. TAGILCEVA¹, K.O. KRIMCEVA¹

¹Tomsk state university of control systems and radioelectronics ²Crystal T Ltd, Tomsk

DEVICES FOR MODULATION AND CONVERTING LASER RADIATION BASED ON RKTP CRYSTAL

In this article the usage of non-linear optic crystal RKTP in devices for modulation and converting laser radiation is presented. The results of verification of technical parameters of q-switch and elements for second harmonic generation (SHG) are included and also the results of acousto-optic characteristics of RKTP crystals are submitted.

Кристаллы RKTP производства компании ООО «Кристалл Т» имеют ряд преимущественных особенностей, к числу которых относятся высокий порог оптического повреждения (2,5 Γ BT/см²), позволяющий применять его в лазерах со средней мощностью до 2 кВт, высокое электрическое сопротивление 10^{12} Ом·см, исключающее появление эффекта электрохромной деградации, большие объемы однородного материала, позволяющие изготавливать элементы с апертурой оптического луча до 20 мм. На основе выше описанного материала производятся электрооптические (ЭО) затворы [1], устройства для Γ ВГ лазерного излучения. Контрастность ЭО затворов, характеризуемая

отношением интенсивностей света, прошедшего через модулятор, в открытом и закрытом состоянии достигает 35 дБ. Экспериментальные исследования устройств для Γ В Γ показали эффективность преобразования до 70% мощности света с длиной волны λ =1064 нм во вторую гармонику при плотности мощности лазерного излучения 50 МВт/см².

В компании ООО «Кристалл Т» были изготовлены прототипы акустооптических затворов на основе кристаллов RKTP [2]. А так же проведены исследования наиболее важных акустооптических характеристик кристаллов RKTP, таких как: коэффициент акустооптического качества $(4,2\cdot10^{-15}~{\rm c}^3/{\rm kr})$, скорость распространения акустической волны $(7,76\cdot10^3~{\rm m/c})$ и фотоупругие коэффициенты $p_{13}^E=0,109$, $p_{23}^E=0,156$, $p_{33}^E=0,224$.

Измеренные акустооптические характеристики кристаллов RKTP позволяют проводить их качественный анализ и прогнозировать поведение модуляторов на основе кристаллов RKTP при проектировании оптических схем. Следует также отметить, что кристаллы RKTP обладают собственными пьезоэлектрическими свойствами, позволяющими применять их в акустооптических и акустоэлектронных устройствах СВЧ радиодиапазона. Совместно с университетом «Huazhong University of Science and Technology, National Engineering Center for Laser Processing» и компаниями «Wuhan Jiyuan Technical Service CO. Ltd.» и «НЕ Laser», КНР, были проведены испытания ЭО затворов и устройств для ГВГ в составе установок для лазерной резки листового металла.

В ходе испытаний установлено, что ЭО затворы обладают стойкостью к повреждению лазерным излучением (λ =1064 нм) со средней мощностью не менее 1 кВт в режиме модуляции добротности. Испытания устройств ГВГ показали стойкость кристаллов RKTP к оптическому повреждению при мощности излучения лазера с длиной волны λ =1064 нм не менее 450 Вт и эффективности 70% преобразования лазерного излучения во вторую гармонику.

Работы проводились при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

- 1. Паргачёв И.А., Серебренников Л.Я., Краковский В.А. и др. Электрооптические модуляторы лазерного излучения на основе высокоомных кристаллов КТР // Доклады ТУСУРа. 2011. №2(24). Ч.2. С.116-118.
- 2. Серебренников Л.Я., Краковский В.А., Паргачёв И.А., и др. Акустооптические модуляторы лазерного излучения на основе кристаллов RKTP // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.:НИЯУ МИФИ, 2014. С.131-132.

Е.В. ОСИПОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО, И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS/CdS/ZnS, ВНЕДРЕННЫХ В ОДНОМЕРНЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

В данной работе исследовались оптические свойства квантовых точек CdSe/CdS/ZnS, внедренных в одномерные фотонные структуры на базе пористого кремния. Показано изменение спектра люминесценции в зависимости от морфологии фотонной структуры, влияние способа окисления фотонной структуры, измерено угловое распределение излучения и кинетика люминесценции.

E.V. OSIPOV, D.S. DOVZHENKO, I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics Institute)

OPTICAL PROPERTIES OF CdSe/ZnS/CdS/ZnS SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS EMBEDDED IN ONE DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS BASED ON POROUS SILICON

Here, we study optical properties of CdSe/ZnS/CdS/ZnS semiconductor quantum dots embedded in one-dimensional photonic structures based on porous silicon. Dependence of luminescence spectrum modulation on photonic structure morphology and influence of oxidation of photonic structure have been shown. Angular distribution and kinetics of luminescence have been measured.

В настоящее время большой интерес представляют сенсорные и диагностические системы на основе различных люминесцентных маркеров, например квантовых точек (КТ), которые обладают высокой фотостабильностью и квантовым выходом. Отдельный интерес представляет управление оптическими свойствами КТ при внедрении их в фотонные структуры, и в частности, в одномерные фотонные структуры на базе пористого кремния (ПК), например в распределенный брэгговский

отражатель и в несимметричные микрорезонаторы Фабри-Перо на основе ΠK [1].

В данной работе методом электрохимического травления были изготовлены микрорезонаторы и распределенные брэгговские отражатели на основе ПК и исследованы оптические свойства внедренных в них КТ CdSe/ZnS/CdS/ZnS.

Отдельной задачей при создании таких структур является уменьшение поглощения кремнием в видимом диапазоне. Для этого было исследовано влияние окисления различных типов на оптические свойства микрорезонаторов с внедренными в них КТ и исследована их фотостабильность.

В работе показано структурирование спектра люминесценции КТ в микрорезонаторе: появление узкого пика люминесценции с шириной ~7 нм., соответствующего собственной моде микрорезонатора. Обнаружено изменение диаграммы направленности люминесценции КТ точек, внедренных микрорезонатор (рис. 1).

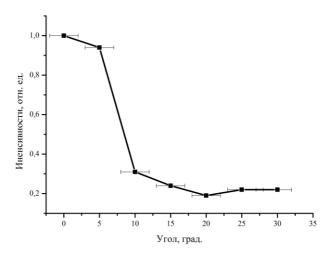


Рис. 1. Распределение по углу интенсивности люминесценции квантовых точек, внедренных в микрорезонатор

Список литературы

1. Aisyiyah J., Pace S., Sciacca B., Brooks R., Plush S., Voelcker N. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2014. V.6(15). P.12012–12021.

С.С. НАЛЕГАЕВ, Д.А. ХОРОШИХ, А.Н. ЦЫПКИН

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКОЛ И КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Нелинейные оптические свойства стекол и жидкостей с квантовыми точками CdSe были исследованы экспериментально. Зависимости нелинейного коэффициента преломления n_2 от размера квантовых точек были получены методом z-scan.

S.S. NALEGAEV, D.A. HOROSHIH, A.N. TSYPKIN

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

A STUDY OF PARTICULARITIES OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF GLASSES AND COLLOIDAL SOLUTIONS WITH QUANTUM DOTS

Nonlinear optical properties of glasses and liquids with quantum dots of CdSe were investigated experimentally. Dependencies of a coefficient of the nonlinear refraction n_2 from a size of quantum dots were received by z-scan technique.

Материалы на основе квантовых точек, благодаря особенностям их физических свойств, связанным с дискретными уровнями энергии, интенсивно исследуются вплоть до настоящего времени. Ряд научных лабораторий опубликовали работы, касающиеся их нелинейных свойств зависимостей Исследования линейных характеристик от размера и формы квантовых точек позволяют управлять их линейными и нелинейными свойствами с помощью подбора определенного размера и формы квантовых точек. Коллоидные растворы стекла с незначительной концентрацией квантовых демонстрируют намного более сильные нелинейные свойства в сравнении с матрицей стекла или вещества растворителя коллоидного раствора квантовых точек. Нелинейные среды на основе квантовых точек особенно интересны для применения в новейших интегрированных нанофотонных устройствах. В настоящее время исследования нелинейно-оптических свойств материалов с квантовыми точками, в том числе измерения

коэффициентов n_2 и их зависимостей от размера квантовых точек или выбора матрицы стекла (или вещества растворителя коллоидного раствора) проведены для ограниченного числа длин волн оптического излучения, равно как и размеров квантовых точек, поэтому задача более широкого их исследования достаточно актуальна.

В данной работе с использованием метода z-scan [15] были проведены исследования нелинейно-оптических свойств жидкостей и стекол с квантовыми точками CdSe. Также были получены нелинейного показателя преломления n_2 от размера квантовых точек. Полученные данные измерений n_2 говорят об обратно-пропорциональной зависимости n_2 от размера квантовых точек, характер которой близок к линейной, что может быть связано с высокой плотностью мощности фемтосекундной оптического излучения лазерной использованной в экспериментах z-scan. Нелинейные свойства квантовых точек зависят не только от размера, но также и от интенсивности оптического излучения накачки, что показано, например в [10-14]. Параметры фемтосекундной лазерной системы: длительность 45 фс, длина волны 802 нм, частота повторения 70 МГц, диаметр пучка 4 мм. Образцы исследования были предоставлены исследовательским технологическим институтом оптического материаловедения «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Авторы благодарят за поддержку министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания, а также выражают благодарность Алексею Аркадьевичу Онущенко за ценные комментарии относительно теории и физики квантовых точек.

- 1. Ma S.M., Seo J.T., Yang Q., et. al. // Appl. Surf. Sci. 2007. V.253. P.6612.
- 2. Gaponenko S.V., Woggon U., Saleh M., et. al. // J. Opt. Soc. Am. 1993. V.B10. P.1947.
- 3. Pan L., Tamai N., Kamada K., Deki S. // Appl. Phys. Lett. 2007. V.91. P.051902.
- 4. Dancus I., Vlad V.I., Petris A., et. al. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2008. V.10. P.149.
- 5. Loicq J., Renotte Y., Delplancke J.-L., Lion Y. // New J. Phys. 2004. V.6. P.32. 6. Seo J.T., Ma S., Lee K., Tabibi B., et. al. // Phys. Status Solidi. 2004. V.4. P.771.
- 7. Tan G.L., Yang Q., Hommerich U., et. al. // Opt. Mater. 2004. V.27. P.579.
- 8. Patton B., Langbein W., Woggon U., et. al. // Phys. Rev. 2006. V.B73. P.235354.
- 9. Kataoka T., Tokizaki T., Nakamura A. // Phys. Rev. B. 1993. V.48(4). P.2815.
- 10. Dancus I., Vlad V.I., Petris A. et. al. // Optics Letters. 2010. V.35. N.7. P.1079-1081.
- 11. Irimpan L., Nampoori V.P.N., Radhakrishnan P. // J.Appl.Phys. 2008. V.103. P.033105
- 12. Перлин Е.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2000. №3(88). С.439-445.
- 13. Перлин Е.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2000. №6(88). С.987-992.
- 14. Беляев А.Г., Богданов В.Л., Непорент Б.С. и др. // Опт. журн. 1995. №11. С.55.
- 15. SheikBahae M., Said A.A., Hagan D.J., et. al // Opt. engin. 1991, V.30, No.8, P.1228-1235.

С.А. АЛИЕВ, Н.С. ТРОФИМОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ГЕЛЬ-ТЕХНОЛОГИИ

В работе исследуется фоточувствительность пленок с различным содержанием диоксида титана. Для получения пленок используется гель-метод, позволяющий получать пленки диоксида титана с содержанием анатаза, близким к 100%. Для исследования используется метод ЭПР спектроскопии.

S.A. ALIEV, N.S. TROFIMOV, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' friendship university of Russia, Moscow

TITAN DIOXIDE FILMS PHOTOSENSITIVITY RESEARCH BASED ON GEL-TECHNOLOGY METHOD

In the article photosensitivity of films with various titan dioxide content is investigated. For titan dioxide films with anatase levels close to 100% gel-method is best used. In research the electron paramagnetic resonance spectroscopy is used.

В настоящее время большое внимание исследователей, как физиков, так и химиков, обращено на нанокристаллический диоксид титана. Интерес к этим исследованиям обусловлен благодаря их использованию в фотокатализе, в частности, при фотолизе воды, как экономически выгодного способа получения водорода. Кроме того, фоточувствительность пленок дает перспективы их использования для создания высокоэффективных солнечных батарей.

Известно. принцип действия что диоксида титана фотокатализатора, основан на формировании на его поверхности в процессе облучения ряда радикалов, являющихся сильными окислителями. Вступая реакцию окисления В c различными органическими веществами эти радикалы способны разложить их до простейших составляющих.

Модификация диоксида титана в форме анатаза представляет наибольший интерес для указанных применений, поскольку обладает наибольшей удельной поверхностью за счет наноструктурирования, что позволяет повысить выход реакции фотоокисления.

Целью настоящей работы является исследование фоточувствительности пленок TiO_2 , изготовленных по гель-технологии [1], которая позволяет получить пленки диоксида титана с содержанием анатаза, близким к 100%.

По указанной технологии была изготовлена серия образцов пленок диоксида титана, параметры которых, а именно толщина и показатель преломления, варьировались путем изменения скорости вытягивания подложки из раствора, температуры раствора и температуры и времени отжига

Полученные образцы были исследованы путём ЭПР-спектроскопии. Облучение проводилось стандартной ртутной лампой.

На рис. 1 представлены спектры ЭПР-пленки ${\rm TiO_2}$ в форме анатаза до и после освещения.

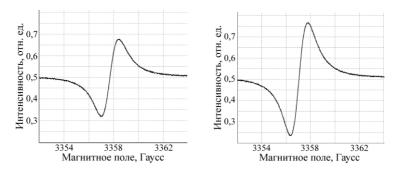


Рис. 1. Спектры ЭПР-пленки ТіО2 до (слева) и после (справа) облучения

Как и предполагалось [2], пленки диоксида титана в форме анатаза проявляют набольшую фотоактивность, чем рутильная и смешанные модификации, в то время как диоксид титана в аморфной фазе не генерирует на его поверхности в процессе облучения свободных радикалов и не проявляет фоточувствительности в УФ-диапазоне.

- 1. Евтушенко Ю.М., Ловецкий К.П., Павлов С.В., Ромашкин С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. Оптические свойства пленок на основе TiO_2 , изготовленных по гельтехнологии // Тезисы 5 Всеросс. конф. «Химия пов. и нанотехн.». Санкт-Петербург, 2012. С.275-276.
- 2. Алиев С.А., Трофимов Н.С. Исследование фоточувствительности методом ЭПР спектроскопии пленок TiO₂, изготовленных по гель-технологии // Тезисы L Всероссийской научной конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. М.: РУДН, 2014. С.277-279.

Г.Е. АДАМОВ 1 , Е.В. ВЕРБИЦКИЙ 2 , Е.П. ГРЕБЕННИКОВ 1 , Е.В. ЗИНОВЬЕВ 1 , Н.О. ПОРОШИН 1 , Г.Л. РУСИНОВ 2 , П.С. ШМЕЛИН 1

ОАО «ЦНИТИ «Техномаш», Москва ¹Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург

УСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФЛУОРОФОРА $C_{33}H_{23}N_3O_2S$ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ

Представлено исследование люминесценции флуорофора $C_{33}H_{23}N_3O_2S$ в зависимости от концентрации наночастиц серебра. Увеличение люминесценции в присутствии наночастиц указывает на образование гибридной наноструктуры.

G.E. ADAMOV 1 , E.V. VERBITSKIY 2 , E.P. GREBENNIKOV 1 , E.V. ZINOVEV 1 , N.O. POROSHIN 1 , G.L. RUSINOV 2 , P.S.SHMELIN 1

OJSC «CSRIT «Technomash»

¹I.J. Postovsky institute of organic synthesis UB RAS, Ekaterinburg

LUMINESCENCE ENHANCEMENT C₃₃H₂₃N₃O₂S FLUOROPHORE IN THE PRESENCE OF SILVER NANOPARTICLES AS EVIDENCE OF FORMATION HYBRID NANOSTRUCTURES

Presented fluorophore $C_{33}H_{23}N_3O_2S$ luminescence depending on the concentration of silver nanoparticles. The increase of luminescence in the presence of nanoparticles points to the formation of hybrid nanostructures.

Исследованы оптические свойства флуорофора 4- $\{4[5-(4-дифениламино-фенил)-тиофен-2ил]$ -пиримидин-5-ил $\}$ -бензойной кислоты (рис. 1) в присутствии наночастиц [1]. В частности, установлено увеличение интенсивности флуоресценции $C_{33}H_{23}N_3O_2S$ в зависимости от концентрации наночастиц серебра, представленной на рис. 2.

Наблюдаемое увеличение интенсивности флуоресценции может быть объяснено усилением электромагнитного поля вблизи поверхности наночастицы серебра, к которой благодаря отрицательному заряду карбокси-группы имеет сродство исследуемое вещество. Флуоресценция

возбуждается на дине волны 405 нм. и именно в этой области для наночастиц серебра есть условия для возникновения плазмонного резонанса [2]. При дальнейшем увеличении концентрации наночастиц серебра происходит vвеличение поглошения и рассеяния возбуждающего флуоресценцию излучения, так и самой флуоресценции. настоящее время проводится моделирование распространения возбуждающего излучения и вызванной им флуоресценции в растворе для количественного сравнения с экспериментальными данными.

Брутто-формула: C₃₃H₂₃N₃O₂S

Рис. 1. Структурная формула 4-{4[5-(4-дифениламино-фенил)-тиофен-2ил]пиримидин-5-ил}-бензойной кислоты

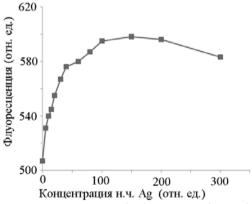


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции флуорофора $C_{33}H_{23}N_3O_2S$ от концентрации наночастиц серебра в хлороформе

- 1. Крутяков Ю.А., Оленин А.Ю., Кудринский А.А., Джурик П.С., Лисичкин Г.В. Агрегативная устойчивость и полидисперсность наночастиц серебра, полученных в двухфазных водно-органических системах // Российские нанотехнологии. 2008. Т.З. №5-6. С.62-67.
 - 2. Климов В.В. Наноплазмоника. Из-во ФИЗМАТЛИТ, 2009.

А.С. МЕРЕЩЕНКО, П.К. ОЛЬШИН, М.Ю. СКРИПКИН, Ю.С. ТВЕРЬЯНОВИЧ, А.Н. ТАРНОВСКИЙ $^{\mathrm{I}}$

Санкт-Петербургский государственный университет ¹Государственный университет Боулинг Грина, Боулинг Грин, США

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ФОТОХИМИЯ ХЛОРИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ(II) В АЦЕТОНИТРИЛЕ

В данной работе была изучена фотохимия трех хлоридных комплексов меди(II) в растворе ацетонитрила, $CuCl^+$, $CuCl_3^-$, и $CuCl_4^{2-}$, методами актинометрии и фемтосекндной спектроскопии поглощения и выявлены основные пути релаксации возбужденного электронного состояния переноса заряда с лиганда на металл (ПЗЛМ): радикальная фотодиссоциация с восстановлением меди(II) до меди(I), радикальная фотодиссоциация с восстановлением меди(II) до меди(I), ионная фотодиссоциация без восстановления меди(II) и внутренняя конверсия в основное электронное состояние изначального комплекса.

A.S. MERESHCHENKO, P.K. OLSHIN, M.YU. SKRIPKIN, YU.S. TVERYANOVICH, A.N. TARNOVSKY¹

Saint-Petersburg state university

Bowling Green state university, Bowling Green, USA

FEMTOSECOND PHOTOCHEMISTRY OF COPPER(II) CHLOROCOMPLEXES IN ACETONITRILE

Photochemistry of three copper(II) chlorocomplexes in acetonitrile solution, CuCl⁺, CuCl₃⁻, and CuCl₄²⁻, was studied by the combination of the steady-state photolysis and time-resolved ultrafast spectroscopy methods enabling us to reveal the main relaxation pathways of the initially excited Ligand-to-Metal Charge Tansfer (LMCT) state: radical dissociation with photoreduction of copper(II) to copper(I), ionic dissociation without photoreduction of copper(II), and internal conversion to the electronic ground state parent complex.

В данной работе была изучена фотохимия трех заряженных хлоридных комплексов меди(II) в растворе ацетонитрила, $\operatorname{CuCl}_{4}^{+}$, $\operatorname{CuCl}_{3}^{-}$, и $\operatorname{CuCl}_{4}^{2-}$, методами актинометрии и фемтосекндной спектроскопии поглощения и выявлены основные пути релаксации возбужденного электронного состояния переноса заряда с лиганда на металл (ПЗЛМ) [1]. Основная часть изучаемых комплексов в возбужденном ПЗЛМ состоянии релаксирует в основное электронное состояния через d-d возбужденные состояния. Небольшая часть комплексов $[\operatorname{Cu}^{\mathrm{II}} \operatorname{Cl}_{\mathrm{n}}]^{2-\mathrm{n}}$ в возбужденном

ПЗЛМ состоянии диссоциирует с образованием ионных продуктов без изменения степени окисления иона меди ($[Cu^{II}Cl_{n-1}]^{3-n} + Cl^{-}$) либо радикальных продуктов ($[Cu^{IC}l_{n-1}]^{2-n} + Cl^{-}$), причем данный процесс сопровождается восстановлением меди(II) до меди(I). Хлоридные комплексы меди являются лабильными комплексами, поэтому продукты ионной диссоциации рекомбинируют образуя исходные комплексы. Радикальные продукты реакции приводят к последующей цепи химических реакций, например, реагируют с растворителем.

Квантовый выход фотовосстановления меди(II) до меди(I) полученный по результатам актинометрии коррелирует с результатами фемтосекндной спектроскопии поглощения и не зависит от присутствия кислорода в растворе. Так, комплекс $CuCl^+$ характеризуется максимальным квантовым выходом фотовосстановления меди(II) до меди(I), 5 %, и соответствует максимальному выходу радикальных продуктов фотодиссоциации на 1 нс. Комплекс $CuCl_3$ характеризуется промежуточным квантовым выходом фотовосстановления меди(II) до меди(I), 1.5 %, и соответствует промежуточному выходу радикальных продуктов фотодиссоциации на 1 нс. По данным актинометрии, комплекс $CuCl_4^2$ — фотостабильный. Для данного комплекса было показано отсутствие радикального канала фотодиссоциации.

А.С. Мерещенко выражает благодарность СПбГУ за финансовую поддержку (грант постдоков № 12.50.1562.2013). Авторы выражают благодарность фонду РФФИ (проект № 14-03-01003). Оптические измерения проводились при помощи оборудования ресурсного центра «Оптические и лазерные методы исследования вещества» СПбГУ.

Список литературы

1. Mereshchenko A.S., Olshin P.K., Karimov A.M., Skripkin M.Yu., Burkov K.A., Tveryanovich Yu.S., Tarnovsky A.N. // Chem. Phys. Lett. 2014. 615. P.105-110.

В.А. КРИВЕНКОВ, П.С. САМОХВАЛОВ, Д.О. СОЛОВЬЕВА, Р.С. БИЛАН, А.А. ЧИСТЯКОВ, И.Р. НАБИЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДВУХФОТОННО-ВОЗБУЖДАЕМЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В БИОНАНОГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ-БАКТЕРИРОДОПСИН

В работе продемонстрирован двухфотонно-возбуждаемый Фёрстеровский резонансный перенос энергии (ФРПЭ) между квантовыми точками (КТ) CdSe/ZnS и светочувствительным белком бактериородопсином (БР) в составе бионаногибридного материала КТ-БР. Сечение двухфотонного поглощения КТ на два порядка превосходило сечение БР. Работа показывает возможность запуска фотоцикла БР, путем селективного двухфотонного возбуждения КТ в инфракрасной области спектра с последующим ФРПЭ от КТ к БР.

V.A. KRIVENKOV, P.S. SAMOKHVALOV, D.O. SOLOVYEVA, R.S. BILAN, A.A. CHISTYAKOV, I.R. NABIEV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

TWO-PHOTON INDUCED RESONANCE ENERGY TRANSFER IN QUANTUM DOTS-BACTERIORHODOPSIN BIONANOHYBRID MATERIAL

We demonstrate here the two-photon-induced Förster resonance energy transfer (FRET) from CdSe/ZnS quantum dots (QDs) to the photosensitive protein bacteriorhodopsin (bR) in the QD-bR hybrid material. The two-photon absorption cross section of QDs was found to be about two orders of magnitude larger than that of bR. This study has demonstrated the possibility of initiating bR photoconversion through selective excitation of QDs in the infrared spectral region in a two-photon mode, followed by FRET from the QDs to bR.

Полупроводниковые квантовые точки в качестве донора при Ферстеровском резонансном переносе энергии (ФРПЭ) значительно увеличивают эффективность фотопреобразования в светочувствительном белке бактериородопсине (БР) [1]. Однако, однофотонное возбуждение системы КТ-БР неселективно, т.к. возбуждаются не только КТ, но и молекулы БР, имеющего широкий спектр поглощения. Двухфотонное возбуждение такой системы может быть более селективным, т.к. сечение двухфотонного поглощения КТ [2] на два порядка превышает сечение БР

[3]. Кроме того, двухфотонное возбуждение позволяет запуск фотоцикла БР в составе системы КТ-БР в инфракрасной (ИК) области спектра, что расширяет область применимости этого материала. В этой работе мы исследовали двухфотонно-возбуждаемый ФРПЭ от полупроводниковых КТ CdSe/ZnS к БР в форме пурпурных мембран (ПМ).

Чтобы показать, что ФРПЭ является преобладающим механизмом тушения флуоресценции в исследованной системе ПМ-КТ, нами были использованы два образца водорастворимых КТ с максимумами флуоресценции на длинах волн 570 (КТ-570) и 630 нм (КТ-630) по причине различия в величине перекрытия их спектров флуоресценции со спектром поглощения БР, а следовательно с разной эффективностью ФРПЭ (для образца КТ-630 она меньше).Мы также сравнили влияние на КТ-570 пурпурных и белых мембран (БМ-ПМ, из которых был удален их светочувствительный компонент ретиналь). Таким образом, ФРПЭ в системе БМ-КТ невозможен.

В экспериментах мы измеряли сигнал флуоресценции КТ, возбуждаемый двухфотонно при помощи фемтосекундной лазерной системы. Увеличение концентрации БР в системе ПМ-КТ-570 приводило к монотонному снижению интенсивности и времени затухания флуоресценции. В системах БМ-КТ-570 и ПМ-КТ-630 это снижение было намного слабее или отсутствовало. Эти результаты подтверждают, что при двухфотонном возбуждении системы ПМ-КТ-570 происходит ФРПЭ между КТ и БР. Мы также измерили эти зависимости и при однофотонном возбуждении, получив схожие результаты.

В работе был реализован двухфотонно-возбуждаемый ФРПЭ в бионаногибридной системе БР-КТ. В перспективе это дает возможность запуска фотоцикла БР, путем селективного двухфотонного возбуждения КТ в ИК-области спектра с последующей передачей энергии от КТ к БР через ФРПЭ.

- 1. Rakovich A., et. al. // NanoLett. 2010. V.10(7). P.2640-2648.
- 2. Larson D.R., et. al. Science. 2003. V.300(5624). P.1434-1436.
- 3. Birge R.R., Fleitz P.A., Lawrence A.F., Masthay M.A., Zhang C.F. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. V.189(1). P.107-122.

СЛ СЕМЁНОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СВЕТОВОДЫ В НАУЧНОМ ЦЕНТРЕ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ РАН

Будет дан обзор результатов в области микроструктурированных световодов, полученных в последнее время в Научном центре волоконной оптики РАН.

S.L. SEMJONOV

Fiber optics research center of the RAS, Moscow

MICROSTRUCTURED FIBERS IN FIBER OPTICS RESEARCH CENTER OF THE RAS

Recent results obtained in Fiber optics research center of the RAS in the field of microstructured optical fibers are reviewed.

Микроструктурированные световоды — это сравнительно новый класс волоконных световодов. Их необычная структура может приводить к получению оптических характеристик, недостижимых для обычных световодов. Цель данной презентации — краткий обзор достижений НЦВО РАН в этой области. В частности будут обсуждаться следующие типы микроструктурированных световодов:

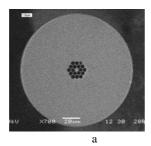
Фотонно-кристаллические световоды, оптимизированные для генерации суперконтинуума в области 400-2500 нм (рис. 1а). Разработанные световоды в частности, характеризуются повышенной стойкостью к фотопотемнению под действием У Φ -излучения.

Новый дизайн фотонно-кристаллических световодов с высоким двулучепреломлением и малой асимметрией поля моды. В этом случае все отверстия отражающей оболочки световода имеют одинаковый размер, но в первом ряду отверстий вокруг сердцевины один или два зазора между отверстиями имеют увеличенную ширину (рис. 16). Такая конструкция позволила получить при практически круглой форме поля моды величину двулучепреломление в световоде до 2.7×10^{-3} [1].

Нами продемонстрировано пропускание света через световод из кварцевого стекла с полой сердцевиной и отрицательной кривизной границы сердцевины (рис. 2a) в диапазоне от 2,5 до 7,9 мкм. Измеренные

оптические потери в таком световоде не превышали 50 дБ/км на длине волны 3,39 мкм в маломодовом режиме [2].

Были разработаны сплошные (без воздушных отверстий) активные и пассивные световоды с фотонной запрещенной зоной и малой величиной отношения диаметра элементов отражающей оболочки к расстоянию между ними (<0,2). Такая конструкция световода является хорошим кандидатом для получения режима реального одномодового распространения света при большом диаметре поля моды [3].



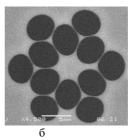
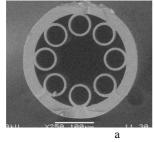


Рис. 1. Торцы микроструктурированных световодов: для генерации суперконтинуума (а), с высоким двулучепреломлением и малой ассиметрией поля моды (б)



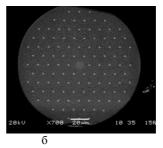


Рис. 2. Световод с полой сердцевиной (а) и сплошной (без отверстий) световод с фотонной запрещенной зоной (б)

- 1. Denisov A.N., Levchenko A.E., Semjonov S.L., Dianov E.M. // Proc. SPIE. 2011. V.7914. P.79142G.
- 2. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. // Opt. Express. 2013. V.21. P.9514-9519.
- 3. Semjonov S.L., Egorova O.N, Kosolapov A.F, Levchenko A.E., Velmiskin V.V., Pryamikov A.D., Salganskiy M.Yu., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. // Proc. SPIE. 2010. V.7580. P.758018.

В.П. ДУРАЕВ, С.В. МЕДВЕДЕВ, Е.В. КАСАТКИН 3AO «Нолатех», Москва

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Представлены результаты отечественных разработок по созданию элементной базы для оптоэлектроники – одномодовых полупроводниковых лазеров, в том числе перестраиваемых, оптических усилителей, суперлюминесцентных диодов, фотоприемных устройств.

V.P. DURAEV, S.V. MEDVEDEV, E.V. KASATKIN

JSC "Nolatech", Moscow

DOMESTIC ELEMENT BASE FOR OPTOELECTRONICS

The results of domestic developments on the creation of the element base for optoelectronics - single-mode semiconductor lasers, including tunable lasers, optical amplifiers, superluminescent diodes, photodetectors are presented.

Современные информационные сети нельзя себе представить без применения в них элементов фотоники. Примером тому является то, что полупроводниковые лазеры, приёмные и передающие оптические модули и усилители сделали возможным революционное преобразование в области средств связи (заменив проводные и кабельные линии на волоконно-оптические) в устройствах записи, хранения, передачи и обработки информации.

Большинство лазеров для связи имеют резонаторы Фабри-Перо. Однако, в последние годы в магистральных линиях связи на большие расстояния для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи информации стали использоваться лазеры с резонаторами с распределенной обратной связью (РОС).

В линиях связи со спектральным уплотнением каналов требуются динамически стабильные режимы одночастотного лазера с очень узкой спектральной линией. Этим требованиям больше всего отвечают лазеры с брэгговскими решетками с шириной линии генерации менее 1МГц [1].

Усиление оптических сигналов рассматривалось первоначально как сопутствующее явление, наблюдаемое при исследовании процессов в лазерных устройствах. Однако с развитием волоконно-оптической техники и технологии оно стало самостоятельным направлением развития оптической техники. В настоящее время наметились несколько направлений в создании оптических усилителей. Основные типы оптических усилителей: эрбиевые усилители и полупроводниковые оптические усилители [2].

Отечественные суперлюминесцентные диоды (СЛД) выпускаются в диапазоне длин волн 650-1650нм с мощностью излучения от 0,1 до 50 мВт. Ширина спектра излучения СЛД составляет 20-40 нм. Вывод излучения может производиться, как в открытое пространство, так и через волоконный световод.

В работе представлены результаты создания перестраиваемых полупроводниковых лазеров [3]. Широкое распространение получили лазеры с распределенной обратной связью (РОС). Данный класс лазеров имеет одночастотный режим работы и достаточно большую оптическую мощность излучения в широком диапазоне температур. В данной работе представлены результаты разработки и исследований характеристик одночастотных перестраиваемых полупроводниковых лазеров с волоконно-брэгговской решеткой в диапазоне длин волн 650–1650 нм. Плавная перестройка длины волны может быть осуществлена в пределах спектра отражения решетки за счет изменения тока инжекции или температуры ЛД. Величина перестройки зависит от контура отражения решетки (0.15–0.3 нм) и составляет соответственно в пределах 0.3 нм.

- 1. Дураев В.П., Неделин Е.Т. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгтовской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530-1560 нм // Квантовая электроника. 2001. Т.31. №6. С.529-530.
- 2. Дураев В.П., Медведев С. В. Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840–1550 нм // Научное приборостроение. 2012. Т.22. №3. С.53–57.
- 3. Дураев В.П., Медведев С. В. Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры // Физика и техника полупроводников. 2014. Т.48. Вып.1. С.125-128.

А.Н. КОЛЯДИН, А.Ф. КОСОЛАПОВ, А.Д. ПРЯМИКОВ, А.С. БИРЮКОВ, Г.К. АЛАГАШЕВ, И.А. БУФЕТОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ДИСПЕРСИЯ В ПОЛЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ ГРАНИПЫ СЕРЛПЕВИНА-ОБОЛОЧКА

Представлены теоретические и экспериментальные данные по дисперсии в полых микроструктурированных световодах с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка. Приведены основные отличительные черты дисперсии в подобных полых световодах.

A.N. KOLYADIN, A.F. KOSOLAPOV, A.D. PRYAMIKOV, A.S. BIRIUKOV, G.K. ALAGASHEV, I.A. BUFETOV

Fiber optics research center of the RAS, Moscow

DISPERSION IN HOLLOW-CORE MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS WITH A NEGATIVE CURVATURE OF THE CORE BOUNDARY

Theoretical and experimental dispersion in hollow core microstructured optical fibers with negative curvature of the core boundary is presented. Main dispersion properties of such hollow core fibers are shown.

Полые микроструктурированные световоды являются новым типом оптических волоконных световодов, излучение в которых распространяется главным образом по полой сердцевине. Полые световоды находят применение в передаче излучения в ближнем и дальнем ИК-диапазоне [1], передаче и компрессии лазерных импульсов и других направлениях. Для передачи и компрессии лазерных импульсов важно знать положение нуля дисперсии, её наклон и конкретное значение для определённой длины волны. Под дисперсией будем понимать вторую производную от реальной части эффективного показателя преломления по длине волны для основной моды сердцевины.

В световодах со стеклянной сердцевиной управление дисперсией достигается за счет создания специального профиля показателя преломления. Однако, возможности такого метода ограничены и не позволяют корректировать значение дисперсии в уже изготовленном

световоде. В плане возможности управления дисперсией полые световоды качественно отличаются от полностью стеклянных. Во-первых, в каждой полосе пропускания полого световода дисперсия проходит через нулевое значение, а положением полос пропускания легко управлять изменением геометрических параметров микроструктурированной оболочки. Вовторых, в готовом световоде возможно менять наклон дисперсии за счёт изменения давления газа, заполняющего сердцевину. В-третьих, как показывают расчеты, возможно изменять наклон кривой дисперсии путём изгиба световода.

На рис. 1 представлены расчетная и экспериментально измеренная дисперсия в полом световоде, а также расчётные потери для основной моды сердцевины. На вставке приведена фотография сердцевины световода. Диаметр сердцевины 26 мкм. Измерения дисперсии проводились интерференционным методом.

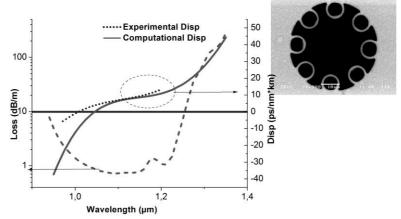


Рис. 1. На графике: пунктирная линия – расчётные потери в световоде (шкала слева); сплошная и точечная линии – расчётная и экспериментальная дисперсия в световоде соответственно (правая шкала). Вставка – поперечное сечение сердцевины световода

Всё это делает изучение изгибных свойств полых световодов важной научной задачей для решения вопросов передачи и компрессии высокомощных лазерных импульсов.

Список литературы

1. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. // Opt. Express. 2011. V.19(2). P.1441-1448.

О.Н. ЕГОРОВА, С.Л. СЕМЁНОВ, В.В. ВЕЛЬМИСКИН, Ю.П. ЯЦЕНКО, С.Е. СВЕРЧКОВ¹, Б.И. ГАЛАГАН¹, Б.И. ДЕНКЕР¹, Е.М. ДИАНОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва ¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

СВЕТОВОД С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЕТ И УЬ, И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

В настоящей работе исследовались характеристики композитного световода с сердцевиной из фосфатного стекла, легированного ионами эрбия и иттербия, и оболочкой из кварцевого стекла. Наклон эффективности генерации при накачке по оболочке на 980 нм составил 39% относительно поглощенной и 28% относительно введенной мощности накачки при длине световода около 50 см.

O.N. EGOROVA, S.L. SEMJONOV, V.V. VELMISKIN, Yu.P. YATSENKO, S.E. SVERCHKOV¹, B.I. GALAGAN¹, B.I. DENKER¹, E.M. DIANOV

Fiber optics research center of the RAS, Moscow Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

PHOSPHATE-CORE SILICA-CLAD Er/Yb-DOPED OPTICAL FIBER

We present a composite optical fiber with a Er/Yb co-doped phosphate-glass core in a silica glass cladding as well as cladding pumped laser. The slope efficiency under 980 nm cladding pumping reached 39% with respect to the absorbed pump power and 28% with respect to the coupled pump power at fiber length of 50 cm.

Фосфатное стекло позволяет вводить концентрацию редкоземельных элементов, на порядок больше, чем легированное кварцевое стекло [1]. Поэтому, при использовании фосфатного стекла вместо кварцевого в качестве материала сердцевины активного световода, длина волоконного лазера или усилителя может быть существенно уменьшена, что важно с точки зрения снижения нежелательного нелинейно-оптического взаимодействия, ограничивающего выходные параметры волоконных лазеров и усилителей [2], а также для создания мощных одночастотных волоконных лазеров [3, 4].

Световоды, целиком состоящие из фосфатного стекла, подвержены деградации; сварка этих световодов со световодами из кварцевого стекла затруднительна из-за различия физико-химических свойств. В данной работе представлен вариант конструкции композитного световода с сердцевиной из фосфатного и оболочкой из кварцевого стекла, в котором кварцевая оболочка обеспечивает механическую надежность, а также позволяет упростить процесс сварки со световодами из кварцевого стекла.

Для сердцевины световода было выбрано лазерное иттербий — эрбиевое фосфатное стекло [5] с концентрацией ионов Yb - 1.7×10^{21} см⁻³, Er - 1.3×10^{20} см⁻³. Из этого стекла с помощью полого трубчатого сверла высверливались цилиндрические заготовки, которые затем вставлялись в трубку из кварцевого стекла. Полученная сборка консолидировалась с помощью нагрева газовой горелкой и перетягивалась в световод. Диаметр сердцевины световода составил 13.5 мкм, числовая апертура на длине волны 633 нм — 0.32, что соответствует значению V-параметра — 9 на длине волны 1.55 мкм. Минимальные оптические потери составили 2 дБ/м. Световод имел достаточную механическую прочность. Также его удавалось приварить к световоду из кварцевого стекла. Поглощение в режиме слабого сигнала, измеренное по оболочке накачки, составило 0.6 лБ/см на длине волны 976 нм.

При исследовании эффективности генерации резонатором служили торцы световода, обеспечивающие 4 % отражение. Максимальный наклон эффективности генерации относительно введенной мощности накачки составил 27-28 % и 36-39 % относительно поглощенной мощности накачки. При этом длина световода составила 50 см, что в несколько раз меньше оптимальной длины световодов с силикатной сердцевиной [6].

- 1. Gapontsev V.P., Matitisin S.M., Isineev A.A., Kravchenko V.B. // Opt. Laser Techn. 1982. V.14. P.189-196.
- 2. Tünnermann A., Schreiber T., Röser F., Liem A., Höfer S., Zellmer H., Nolte S., Limpert J. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2005. V.38. P.681-693.
- $3.\ Xu\ S.H.,\ Yang\ Z.M.,\ Liu\ T.,\ Zhang\ W.N.,\ Feng\ Z.M.,\ Zhang\ Q.Y.,\ Jiang\ Z.H.\ //\ Optics\ Express.\ 2010.\ V.18.\ No.2.\ P.1249-1254.$
- 4. Hofmann P., Voigtländer C., Nolte S., Peyghambarian N., Schülzgen A. // J. of Lightwave Technology. 2013. V.31. No.5. P.756-760.
- 5. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. // Applied Physics B. 2002. V.75. P.41-46.
- 6. Nilsson J., Alam S.U., Alvarez-Chavez J.A., Turner P.W., Clarkson W.A, Grudinin A.B. // IEEE J. Quantum Electronics. 2003. V.39. P.987-994.

М.А. БУХАРИН 2,3 , Д.В. ХУДЯКОВ 1,3 , С.К. ВАРТАПЕТОВ 1

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный ³ООО «Оптосистемы», Москва

ПРЯМАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ СВЕТОВОДОВ С ДЕПРЕССИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКОЙ В ФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ С НЕОДИМОМ

Предложен способ формирования световедущих структур, индуцированных в стекле посредством прямой фемтосекундной записи оболочки с пониженным показателем преломления. Метод апробирован на фосфатном стекле, легированным ионами неодима. Приведено описание экспериментальной установки, анализ потерь, модового состава и поляризационных свойств световодов. Описаны перспективы использования гибридных оптических элементов.

M.A. BUKHARIN^{2,3}, D.V. KHUDYAKOV^{1,3}, S.K. VARTAPETOV¹

¹Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow ²Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny ³Optosystems Ltd., Moscow

DIRECT FEMTOSECOND WRITING OF WAVEGUIDES WITH DEPRESSED CLADDING IN NEODYMIUM DOPED PHOSPHATE GLASS

The technique of waveguide's formation with direct femtosecond writing of depressed refractive index cladding was proposed. It was applied with neodymium doped phosphate glass. The description of the experimental setup and analysis of losses, mode structure and polarization properties were specified. The application perspectives of the hybrid optical elements were proposed.

Под действием сильно сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в оптически прозрачных средах может наблюдаться эффект перманентного изменения показателя преломления [1]. Он может быть использован для создания трехмерных структур в целях интегральной оптики по новой, гибридной технологии [2].

Для индуцирования показателя преломления в стекле использовался фемтосекундный лазер (450 фс, 1.06 мкм) с частотой следования импульсов 1 МГц. В фокальной области пиковая интенсивность достигала

 $5.3~{
m TBT/cm^2}$. Для формирования световедущей структуры с повышенной площадью моды, каждая из линий оболочки записывалась посредством асферической линзы (NA=0.5) и дополнительной линзы (F = 60 мм), увеличивающей расходимость лазерного луча и соответствующее аспектное отношение обрабатываемой области.

При исследовании модового состава волновода была выявлена существенная поляризационная зависимость и низкие потери при распространения излучения (0.6 и 1.0 дБ/см для ортогональных поляризаций).

Благодаря тому, что при записи лазерно-индуцированных волноводов с депрессированной оболочкой свойства материала в жиле остаются неизменными, они обладают широкими перспективами использования в нелинейных преобразователях и усилителях [3].

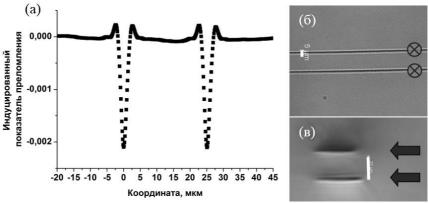


Рис. 1. Профиль показателя преломления записанного световода (а), микрофотография структуры вдоль (б) и поперек (в) записывающего лазерного луча

- 1. Femtosecond laser micromachining / ed. by R. Osellame, R. Ramponi, G. Cerullo. London: Springer-Verlag, 2012.
- 2. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nature Photonics. 2008. V.2. P.219-225.
- 3. Bhardwaj V.R., Simova E., Corkum P.B., Rayner D.M., Hnatovsky C., et. al. Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses // J. Appl. Phys. 2005. V.97. P.083102.

В.В. ВЕЛЬМИСКИН, О.Н. ЕГОРОВА, Д.Ю. ЕРИН, А.К. СЕНАТОРОВ, С.Г. ЧЕРНООК, С.Л. СЕМЁНОВ

Научный иентр волоконной оптики РАН - Москва

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК АКТИВНЫХ КВАРЦЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПУТЕМ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ ОКСИДОВ

Проведена оптимизация ранее исследованного и опробованного нами метода получения заготовок активных кварцевых волоконных световодов путем спекания порошков оксидов. Реализована принципиально новая, более эффективная, методика уменьшения оптических и структурных неоднородностей в получаемом материале. Минимальный уровень оптических «серых» потерь на длине волны $1,13\,$ мкм в изготовленных световодах, активная сердцевина которых содержит $0.26\,$ mol % Yb_2O_3 и $2.27\,$ mol % Al_2O_3 , составил $75\,$ дБ/км.

V.V. VEL'MISKIN, O.N. EGOROVA, D.Yu. ERIN, A.K. SENATOROV, S.G. CHERNOOK, S.L. SEMJONOV

Fiber optics research center of the RAS, Moscow

THE OPTIMIZED FABRICATION METHOD OF THE SILICA ACTIVE OPTICAL FIBER PREFORMS BY SINTERING OF POWDER OXIDES

We optimized our method for producing the silica active optical fiber performs by sintering of powders oxides, which has been investigated and tested earlier. The new effective technique of reduction of optical and structural fluctuations in a obtained optical material was realized. The minimum level of optical background losses in the produced fibers (active core with $0.256 \text{ mol } \% \text{ Yb}_2\text{O}_3$ and $2.268 \text{ mol } \% \text{ Al}_2\text{O}_3$) was 75 dB/km at a wavelength 1,13 um.

Волоконные лазеры, обладая высокой эффективностью, стабильностью оптических характеристик и компактностью, в основном базируются на световодах, легированных ионами редкоземельных элементов. Использование традиционных технологий для изготовления активных лазерных световодов существенно затрудняется, особенно при попытках понизить показатель преломления активного материала для получения световодов с большим диаметром поля моды. Это побудило к поиску новых и усовершенствованию некоторых старых вариантов получения оптических материалов.

В работах [1, 2] описан разработанный и опробованный нами вариант метода создания заготовок активных кварцевых волоконных световодов путем спекания крупнодисперсных порошков оксидов, позволивший получить образцы активного материала на основе кварцевого стекла с величиной оптических потерь ниже 100 дБ/км. Использованная нами методика уменьшения оптических и концентрационных неоднородностей в спеченном материале до субмикронных размеров продемонстрировала хорошие результаты. Но лежащий в ее основе способ многократных перетяжек и консолидации оптического материала оказался все-таки достаточно трудоемким и длительным по времени. Поэтому нами был И реализован новый вариант методики неоднородностей, детали которого будут представлены в презентации.

В ходе работы были получены высокооднородные стержни из легированного материала. Для исследования оптических, люминесцентных и генерационных свойств из стержней после нанесения жакетирования) нелегированной кварцевой оболочки вытягивались волоконные световоды полимерном покрытии. Минимальный уровень серых оптических потерь световодах, солегированных Ур₂О₃ и Аl₂О₃ составил около 75 дБ/км на длине волны 1100 нм.

Разработанная методика позволила также перейти от легирования алюминием к совместному легированию алюминием и фосфором, что позволило понизить показатель преломления материала до уровня кварцевого стекла. В презентации будут приведены результаты тестирования таких образцов.

- 1. Вельмискин В.В., Егорова О.Н., Семенов С.Л. // Третья всероссийская конференция по волоконной оптике. Пермь, 2011. В7-3.
 - 2. Velmiskin V.V., Galagan B.I., Denker B.I., et. al. // Proc. SPIE. 2012. V.8426. P.84260I.

А.А. БОРОДКИН 1 , Д.В. ХУДЯКОВ 1,2 , С.К. ВАРТАПЕТОВ 1

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ²ООО «Оптосистемы». Москва

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ МЕГАГЕРЦОВЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР ПОЛНОСТЬЮ НА ВОЛОКНЕ С ПОДДЕРЖКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В работе представлена схема иттербиевого осциллятора с нелинейным зеркалом, выполненного полностью на волокне с поддержкой поляризации. Частота следования импульсов составляет 5 МГц. Длительность импульса 460 пс, спектральная ширина — 0.04 нм. Проведено математическое моделирование, основанное на численном решении уравнения Шредингера. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментом.

A.A. BORODKIN¹, D.V. KHUDYAKOV^{1,2}, S.K.VARTAPETOV¹

¹Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow ²Optosystems Ltd., Moscow

SUBNANOSECOND-PULSED ALL-PM FIBER Yb-DOPED LASER

We demonstrated an all-PM ANDi Yb-doped fiber oscillator with nonlinear optical loop mirror (NOLM). Pulse energy is 5 nJ with frequency 5 MHz. Pulse duration is 460 ps at $1.03~\mu m$ wavelength with full spectral width at half maximum 0.04~nm.

В настоящее время большое внимание уделяется волоконным лазерам с ультракороткой длительностью импульса. Одним из перспективных способов получения субнаносекундных импульсов в волоконных резонаторах является применение нелинейного волоконного зеркала, выполненного на волоконном разветвителе [1, 2]. Однако, большинство существующих лазеров выполнено на оптическом волокне без поддержки поляризации, в результате чего они подвержены влиянию внешних факторов. Большим преимуществом таких лазеров перед пикосекундными диодами является большая частота следования импульсов и наличие чирпа, который позволяет компрессировать представлен импульсный субнаносекундный работе иттербиевый волоконный лазер с нелинейным волоконным зеркалом, выполненный полностью на волокне с поддержкой поляризации (рис. 1).

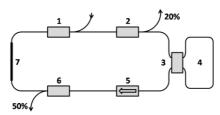


Рис. 1. Схема волоконного субнаносекундного осциллятора: 1- мультиплексор 980/1064, 2,6 - выходной разветвитель, 3 - разветвитель 10/90, 4 - волоконная петля (длина ~30 м), 5 - изолятор-поляризатор, 7 - активное иттербиевое волокно

В работе была использована кольцевая схема резонатора. Все элементы выполнены на одномодовом волокие (6/125) с нормальной дисперсией и поддержкой поляризации (РМ), что обеспечивало поляризационную и температурную стабильность излучения. Волоконная петля 4 и разветвитель 3 представляют собой нелинейное волоконное зеркало. Ширина спектра на полувысоте (рис. 2) составила 0.04 нм. Частота следования импульсов 5 МГц. Энергия в импульсе была 5 нДж. Ширина автокорреляции импульса (рис. 3) на полувысоте составила 460 пс. Для изучения динамики изменения временных и спектральных характеристик импульса волоконного резонатора было проведено математическое моделирование, основанное на численном решении нелинейного уравнения Шредингера. Полученные математические результаты с хорошей точностью согласуются с экспериментом.

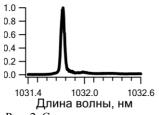


Рис. 2. Спектр волоконного лазера

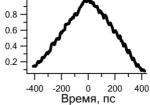


Рис. 3. Автокорреляционная функция выходного импульса

- 1. Ozgoren K., Oktem B., Yilmaz S., Ilday F., Eken K. // Opt. Express. 2011. V.19. P.17647.
- 2. Aguergaray C., Broderick G.R., Erkintalo M., Chen S.Y., Kruglov V. // Opt. Express. 2012. V.20. P.10545.

Н.Г. МИРОННИКОВ 1,2 , Д.И. ДЕРЕВЯНКО 3 , В.П. КОРОЛЬКОВ 1,2 , В.В. ШЕЛКОВНИКОВ 3

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
²Новосибирский государственный университет
³Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН

СКАНИРУЮЩАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ НА ПЛЕНКАХ ГИБРИДНОГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТИОЛ-СИЛОКСАН-АКРИЛАТНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

Исследована запись дифракционных структур на гибридных фотополимерных пленках на основе акрилатных и тиол-силоксановых олигомеров. Запись структур проводилась сканированием сфокусированного излучения импульсного УФлазера (355 нм). Фотополимерная композиция была синтезирована НИОХ СО РАН. Изучены характеристики фотополимерной композиции необходимые для лазерной записи в слоях толщиной порядка нескольких микрометров при скоростях сканирования порядка 1 мм/с. После полимеризации, проявления и термообработки исследованная композиния обеспечивает формирование дифракционных высокой химической структур инертностью термомеханической устойчивостью. Исследованные материал формирования дифракционных структур могут найти применение при синтезе фазовых ДОЭ на криволинейных поверхностях без ионно-плазменного травления.

N.G. MIRONNIKOV^{1,2}, D.I. DEREVYANKO³, V.P. KOROLKOV^{1,2}, V.V. SHELKOVNIKOV³

¹Institute of automation and electrometry SB RAS, Novosibirsk
²Novosibirsk state university
³N.N. Vorozhtsov Novosibirsk institute of organic chemistry SB RAS

THE SCANNING LASER WRITING ON FILM OF THE HYBRID PHOTOPOLYMER MATERIAL BASED ON THIOL-ACRYLATE OLIGOMER SILOXANE

Laser writing of diffractive structures on hybrid photopolymer films based on acrylate and thiol-siloxane oligomers has been investigated. The photopolymer composition has been synthesized by NIOCH SB RAS. Laser writing was made by focused beam of 355 nm pulsed laser. The photopolymer composition and its preparation method have been optimized for laser writing. The characteristics curve of the photopolymer composition has been measured for laser writing in layers with thickness of a few micrometers and with a scan rate of 1 mm/c. The composition ensures

the formation of diffractive structures with high chemical inertness and thermomechanical stability after polymerization, development and post heat treatment. Investigated material and method for formation of diffractive structures can be applied at synthesis of rigid phase DOEs on curvilinear surfaces without reactive ion etching.

фотополимерных Лазерная на золь-гель запись органически-неорганических материалах в настоящее время активно и исследуется в приложении к интегральной и дифракционной оптике. Для термически формирования механически, химически прочных микроструктур на этих материалах не требуется операция реактивного ионного травления (РИТ), что очень важно для синтеза дифракционных структур на криволинейных поверхностях, изменение толщины которых приводит к неравномерности скорости РИТ.

В данной работе исследована запись дифракционных структур фотополимерных пленках на основе акрилатных тиол-силоксановых олигомеров. Фотополимерная композиция НИОХ PAH была синтезирована В CO ИЗ тетраакрилата дигидроксидифенилсульфида тиол-силоксанового олигомера, И содержащего в основном 4,4,8,8-тетраметокси-6,6-дифенил-5,7-диокса-4,6,8-трисилаундекан-1,11-дитиол. Фотополимеризованный имеет структурные блоки, несущие различные функции: силоксановые группы придают гибкость и термоустойчивость, тиольные группы служат спейсером кислородного ингибирования защищают ОТ фотополимеризации, придают способность акрилатные группы полимеризации. В зависимости от соотношения исходных компонентов можно изменять свойства материала под определенную задачу.

Эксперименты по записи структур велись на установке лазерной записи с двухкоординатным столом. D качестве записывающего лазера использовался волоконный импульсный лазер с длиной волны 355 нм, длительностью импульсов 50 нс и средней мощностью пучка 7 мВт. Скорость сканирования сфокусированного до диаметра 3 мкм пучка составляла 1 мм/с.

характеристическая ходе работ были получена фотополимера, также исследованы профиль шероховатость a поверхности полученных периодических Оптимизирован структур. способ приготовления пленок для лазерной записи рельефно-фазовых дифракционных структур.

Финансирование работы осуществлялось за счет интеграционного партнерского проекта СО РАН № 92 и ФЦП «Кадры» Минобрнауки (соглашение № 14.132.21.1669).

К.А. БОРОДАКО 1 , Д.В. ШЕЙФЕР 1,3 , А.В. ШЕЛЯКОВ 1 , Н.Н. СИТНИКОВ 1,2

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
²ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва
³Университет Гамбурга, Германия

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ В СПЛАВЕ TINICU

Изучено формирование обратимого эффекта памяти формы в тонких лентах из сплава TiNiCu, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава, при воздействии лазерного излучения. Установлена зависимость структуры образцов и величины обратимого эффекта памяти формы от параметров лазерной обработки.

K.A. BORODAKO 1 , D.V. SHEYFER 1,3 , A.V. SHELYAKOV 1 , N.N. SITNIKOV 1,2

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

²Federal state unitary enterprise "Keldysh research center", Moscow

³The Hamburg university, Germany

EFFECT OF LASER TREATMENT ON SHAPE MEMORY PROPERTIES OF TINICU ALLOY

The formation of a two-way shape memory effect in thin ribbons of TiNiCu alloy, produced by rapid quenching from the melt, under the action of laser radiation was studied. The dependence of the structure of the samples and the value of two-way shape memory effect on the parameters of the laser treatment was established.

спрос Постоянно возрастающий на сверхпортативную высокоэффективную технику стимулирует разработку малогабаритных, дешёвых и быстродействующих устройств. В последнее время показана эффективность использования сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ), для создания микроустройств в различных областях техники, в частности, в приборостроении, медицине, энергетике, космических технологиях, робототехнике [1]. Для миниатюризации устройств, создания микро- и, возможно, наноустройств становится актуальным получение материалов с ЭПФ в виде тонкой ленты, фольги или пленки. В последнее время особый интерес вызывает получение структурно-композитных материалов с обратимым ЭПФ [2]. Недавно нами показано, что аморфно-кристаллический композит, полученный с

помощью воздействия импульсного лазерного излучения на ленту из быстрозакаленного сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, обладает ярко выраженным обратимым ЭПФ [3]. Настоящая работа посвящена исследованию структуры такой аморфно-кристаллической ленты и ее влияния на величину обратимого ЭПФ. Для модификации свойств сплава использовалось излучение эксимерного лазера серии CL7000 с газовой смесью KrF (длина волны 248 нм, длительность импульса 20 нс). Микроструктура поверхностей и поперечного сечения образцов изучались с помощью инвертированного металлографического микроскопа отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT и растрового электронного микроскопа FEI Quanta 600 FEG. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре PANalytical Empyrean в Cu-К α излучении.

В качестве объекта исследования была выбрана лента из сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ толщиной около 40 мкм и шириной 2 мм, полученная в аморфном состоянии методом сверхбыстрой закалки при скорости охлаждения расплава 10⁶ К/с. Для кристаллизации ленты проводился изотермический отжиг в печи при температуре 500 °C в течение 5 минут. исследования показали, что воздействие лазерного Проведенные излучения на поверхность кристаллизованной из аморфного состояния ленты позволяет достичь существенно большей величины обратимого по сравнению с облучением аморфной ленты. Выявлено существенное уменьшение пиков отражения рентгеновских лучей, соответствующих мартенситной фазе В19, в поверхностном слое кристаллических лент после лазерной обработки, что свидетельствует об аморфизации сплава. При этом изменение плотности энергии одиночного лазерного импульса $E_{\text{паз}}$ от 4 до 20 мДж/мм² приводит к увеличению средней толщины модифицированного слоя от 0,4 до 1,7 мкм. Модификация структуры поверхностного слоя ленты с лазерной обработки приводит к формированию ярко-выраженного обратимого ЭПФ, при этом полученные структурно-композитные образцы способны совершать при термоциклировании заметные обратимые угловые перемещения, величина которых возрастает от 28 до 89 градусов при увеличении $E_{\text{лаз}}$ от 4 до 20 мДж/мм².

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №14-22-00098).

- 1. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. // Materials and Design. 2014. V.56. P.1078.
- 2. Shelyakov A.V., et. al. // Int. J. of Smart and Nano Materials 2, 2011, V.2. P.68-77.
- 3. Бородако К.А., Шейфер Д.В., Ситников Н.Н., Шеляков А.В., Корнеев А.А. // П Всеросс. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ. 2013. С.213.

С.В. ПАВЛОВ, А.Р. РАВИН, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНЗ

В работе исследуется возможность компенсации температурного дрейфа параметров тонкопленочных линз с помощью использования золь-гель материалов, обладающих отрицательным термооптическим коэффициентом. Проведен анализ необходимых параметров волноводной системы и рассмотрены оптимальные варианты для температурной стабилизации планарной линзы Люнеберга.

S.V. PAVLOV, A.R. RAVIN, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' friendship university of Russia, Moscow

TEMPERATURE CORRECTION OF CHARACTERISTICS OF PLANAR WAVEGUIDE LENSES

In work possibility of compensation of a thermal drift of parameters of thin-film lenses by means of use sol-gel of the materials possessing the negative thermooptical coefficient is investigated. The analysis of necessary parameters of the waveguide system is carried out and optimum options for temperature stabilization of a planar lens of Luneburg are considered.

Многие интегрально-оптические устройства используют фокусирующие элементы или планарные линзы, с помощью которых формируется необходимый фазовый фронт оптических пучков, осуществляется Фурье-преобразование и др. К таким фокусирующим элементам относятся контурные линзы, представляющие собой тонкопленочные аналоги объемных линз, геодезические линзы, линзы Люнеберга и дифракционные линзы [1].

Разрешающая способность планарных линз ограничивается одномерными аналогами сферической аберрации и аберрации комы. Волноводной линзой, принципиально позволяющей избавиться от геометрических аберраций является тонкоплёночный аналог линзы Люнеберга, представляющий собой радиально-симметричное плавное утолщение волноводного слоя (рис. 1).

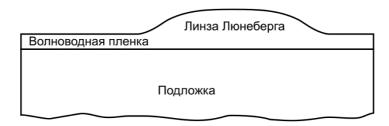


Рис. 1. Волноводная линза Люнеберга

Эффект фокусировки в данном типе линз обеспечивается специальным распределением эффективного показателя преломления.

$$\begin{cases} n(\rho) = \exp \omega(\rho) \\ \rho(r) = n(r)r \end{cases} \omega(\rho) = \frac{1}{\pi} \int_{\rho}^{R} \frac{\arcsin h/f}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} dh$$

где R – радиус линзы, f – фокусное расстояние [2].

Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению параметров линзы, таких как фокусное расстояние и размер фокального пятна за счёт изменения показателей преломления плёнки и подложки в соответствии с их температурными оптическим коэффициентами. Кроме того изменяется и толщина волноводной пленки в результате температурного расширения материала пленки. Использование золь-гель материалов может позволить скомпенсировать температурное изменение характеристик линзы путем подбора соответствующих параметров волноводной системы, а именно показателя преломления и толщины зольгель пленки [3, 4].

- 1. Аникин В.И., Шокол С.В. Фокусирующие элементы интегральной оптики // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. №5. С.67–77.
- 2. Morgan P.S. General solution of the Luneburg lens problem // J. Appl. Phys. 1958. V.29. №9, P.1358.
- 3. Грабовский Е.И., Живцов С.В., Чехлова Т.К. Температурная зависимость золь-гель волноводов // Радиотехника и электроника. 2006. Т.51, №7. С.834–843
- 4. Николаев Н.Э., Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. Исследование температурного коэффициента эффективного показателя преломления ТЕ₁- и ТМ₁- мод в оптических золь-гель волноводах // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №1. С.1–7

О.А. БУРДУКОВА¹, В.А. ПЕТУХОВ, М.А. СЕМЕНОВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва ¹Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

ЛАЗЕРНЫЕ КРАСИТЕЛИ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКИ

Исследованы пороговые характеристики лазерных красителей при предельно малых накачках, на основании этих измерений отобраны вещества, наиболее подходящие для накачки полупроводниковыми лазерами.

O.A. BURDUKOVA¹, V.A. PETUKHOV, M.A. SEMENOV

Lebedev physical institute of the RAS, Moscow

¹Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny

LASER DYES FOR DIODE PUMPING

We have investigated the threshold characteristics of laser dyes at extremely low pump power level, and based on these measurements the most suitable dyes have been chosen for diode pumping.

Лазеры на красителях имеют множество приложений, таких как спектроскопия, зондирование атмосферы, разделение изотопов и т.д. Замена источников традиционных накачки красителей полупроводниковыми лазерами позволит реализовать энергопотребление и компактность лазеров, а также снизить стоимость. Основной проблемой при такой накачке является нехватка плотности мощности для возбуждения молекул красителя. Порог генерации лазеров обратно пропорционален произведению времени жизни в возбужденном состоянии на сечение усиления. Хотя сечения усиления у красителей довольно большие, но из-за малого времени жизни молекул в возбужденном состоянии для заметного усиления требуется не менее 100 кВт/см² при продольной накачке. Попытки осуществить накачку лазеров на красителях полупроводниковыми лазерами уже были, но даже в лучших работах КПД не превышал 2%.

В данной работе предполагалось исследовать пороговые характеристики лазеров на красителях при предельно малых накачках излучением вспомогательного лазера на красителе с длиной волны 445-455 нм, и на основании этих измерений выбрать наилучшие вещества для

голубыми Наиболее накачки полупроводниковыми лазерами. перспективной схемой накачки красителей мошными полупроводниковыми лазерами C нашей точки зрения является поперечная схема с полным внутренним отражением генерируемого излучения в кювете с красителем. Для ее реализации необходимо, чтобы показатель преломления раствора красителя был больше, чем у стенок кюветы. Поэтому основное внимание было уделено исследованию генерационных характеристик красителей, растворенных диметилсульфоксиде (ДМСО) и бензиловом спирте с показателями преломления 1,48 и 1,54 соответственно. заливался в кювету, на внешние поверхности которой были нанесены зеркала с отражением 99% и 98% на длине волны генерации.

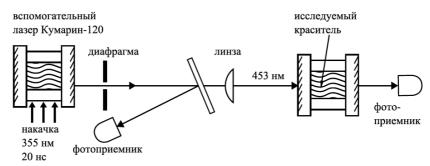


Рис. 1. Схема для измерения генерационных характеристик красителей

Краситель	этанол		ДМСО		бензиловый спирт	
	Е _{порог} , Дж/см ²	Дифф. КПД, %	Е _{порог} , Дж/см ²	Дифф. КПД, %	$E_{\text{порог}}$, Дж/см 2	Дифф. КПД, %
Pyrromethene 546	0,006	6,3	-	-	0,011	11,8
Coumarin 522	0,006	5,3	0,006	2,7	0,009	1,8
Coumarin 334	0,005	5,7	0,004	5,3	0,006	2,5
Coumarin 540	0,007	8,4	0,037	2,2	0,005	5,9
Coumarin 547	0,009	6,9	0,008	8,1	0,007	4,1
LD-halcon	0,006	48,8	0,008	65	0,006	36,4
DCM	0,007	47,4	0,016	48,1	0,006	40,9
DCM-17	0,006	49,3	0,007	69,8	0,015	25,8
Rhodamine 6G	0,013	17,0	0,026	16,6	0,009	3,6

В.Д. ГАВРИЧЕВ, Г. КАРАЧАРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСТВОРОВ ХИМИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ

Температурная зависимость светопропускания некоторых химических индикаторов может быть положена в основу действия волоконно-оптических термометров нового типа. Приведены результаты измерений спектрального пропускания растворов индикаторов (красителей) «Бромфеноловый синий», «Бромтимоловый синий», «Крезоловый красный» в диапазоне длин волн 320-860 нм. При изменении температуры растворов их светопропускание в определенных участках спектра длин волн значительно изменяется. Это создает возможности использования химических индикаторов в чувствительных элементах оптических измерителей и датчиков температуры.

V.D. GAVRICHEV, G. KARACHAROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

SPECTRAL AND TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF THE SOLUTION OF CHEMICAL INDICATORS

Temperature dependence of the transmittance of some chemical indicators can be the basis for the action of new type fiber optic thermometers. The results of measuring the spectral transmission of indicator solution (dye) such as "bromophenol blue," "Bromothymol blue" "cresol red" in wavelength range 320-860 nm are reflected. After the changing the temperature of solutions of their transmission in certain areas of the spectrum of wavelengths varies considerably. This creates the possibility of the use of chemical tracers in sensitive elements of optical measuring devices and temperature sensors.

Создание волоконно-оптических измерителей и датчиков температуры (ВОИТ), применяемых для контроля состояния энергетических объектов в условиях действия сильных электрических и магнитных полей, сегодня является актуальной задачей. Чувствительный элемент такого измерителя температуры не должен содержать металлических или полупроводниковых материалов, чтобы исключить влияние на измерения внешнего электромагнитного поля [1]. Температурные свойства

светопропускания химических индикаторов представляют несомненный интерес для разработчиков таких ВОИТ.

Представленные экспериментальные результаты демонстрируют существенную температурную зависимость светопропускания отдельных видов химических индикаторов от температуры в заданном участке оптического спектра. Исследованы спектральные и температурные характеристики пропускания растворов индикаторов Бромфеноловый синий», «Бромтимоловый синий», «Крезоловый красный» в диапазоне длин волн 320-860 нм [2]. Результаты измерений показали, что в спектре пропускания индикаторов имеются области шириной от 50 нм до 220 нм, в которых величина относительного пропускания раствора индикатора изменяется при изменении температуры раствора по закону, близкому к линейному. При увеличении концентрации раствора химического индикатора «Бромфеноловый синий» происходит сдвиг спектральной области температурной чувствительности пропускания раствора Можно больших длин волн. подобрать концентрацию индикатора «Бромфеноловый синий» для использования в термодатчике в оптическом диапазона длин волн излучения гелийнеонового лазера либо светодиодов 620-700 нм. Экспериментально продемонстрировано действие чувствительного элемента ВОИТ диапазоне температур 20-100 °C.

Основные достоинства измерителя с чувствительным элементом на химических индикаторах — практическая нечувствительность к воздействию сильных электрического и магнитного полей, вибраций, изменений давления и влажности окружающей среды, простота принципа действия, конструкции и, соответственно, высокая надежность в работе и малая стоимость изделия. Волоконно-оптические датчики температуры описанного типа могут использоваться, например, в системах контроля состояния и мониторинга мощных силовых трансформаторов, линий электропередач, СВЧ-трактов и в других областях техники [3].

- 1. Гавричев В.Д., Таджибаев А.И. Оптоволоконные датчики температуры для мониторинга состояния электротехнического оборудования // Энергоэксперт. 2011. №5(28). С.52-53.
 - 2. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971.
 - 3. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007.

В.Ю. ВЕНЕДИКТОВ, М.А. СОЛОВЬЕВ¹

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) ¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Обзорный доклад посвящен вопросам использования голографии и голограмм в датчика волнового фронта для решения задач атмосферной, лазерной и адаптивной оптики.

V.YU. VENEDIKTOV, M.A. SOLOVYEV¹

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

¹Vavilov state optical institute, Saint-Petersburg

HOLOGRAPHIC WAVEFRONT SENSORS

The review talk is devoted to the problems of holography and holograms' application to wavefront sensing in atmospheric, laser and adaptive optics.

Датчики волнового фронта (ДВФ) используются для измерения в реальном времени отличия волнового фронта от плоского или сферического. Полученная информация об искажениях (представляемая чаще всего в виде разложения по первым 20-50 полиномам Цернике) и используется для анализа искажений, вносимых атмосферным или лазерным трактом, и для их коррекции методами адаптивной оптики.

Сегодня в качестве ДВФ чаще всего используются датчики Шака-Гартмана, в которых измеряемый волновой фронт фокусируется на мегапиксельную матрицу с помощью двумерного растра из нескольких сотен микролинз. Мегапиксельный объем информации является в этом случае очевидно избыточным, его обработка занимает много времени и в настоящее время продолжается активный поиск более простых решений этой залачи.

Одним наиболее ИЗ перспективных подходов является T.H. приборе голографический **ЛВФ** (см., например, [1]). таком осуществляется разложение светового пучка при помоши голографических пластин с предзаписанными полиномами Цернике. Если голографический образ полинома дополнить образом дифракционной решётки, то пучок будет фокусироваться в ряд точек, соответствующих дифракционным порядкам. Расстояние между дифракционными порядками будет пропорционально силе аберрации, соответствующей полиному. Таким образом, расположив в соответствующем месте ряд фотодетекторов, можно определять силу аберрации всего лишь номерами возбуждённых приёмников, без вычислений.

Закодировав в голографическую пластину изображения различных полиномов, можно определять силу нескольких аберраций сразу, оперативно получая полную информацию об искажении пучка света.

В настоящее время известен ряд подходов к реализации данного метода (см. также [2-4]), которые описаны и сопоставлены в докладе.

Применение методов оптической голографии может также улучшить и упростить и «классический» ДВФ Шака-Гартмана. Во-первых, технология голографической записи применяется при создании дешевых и высококачественных матриц линз. Во-вторых, классический линзовый растр может быть заменен на двумерную структуру, порождающую известный эффект Тальбота [5].

Этот эффект заключается в самоповторении изображения двумерной дифракционной решётки через равные пространственные промежутки, зависящие от длины волны падающего на решётку излучения. Очевидно, что отклонения волнового фронта, дифрагирующего на решётке, от плоского, будет сказываться на восстановленном изображении, что можно использовать в качестве сигнала, аналогично тому, как это делается в обычном ДВФ Шака-Гартмана.

В обзорном докладе рассматриваются и другие возможные применения голографии в $ДВ\Phi$ – например, совсем недавняя работа [6], посвященная применению для анализа $B\Phi$ поляризационных голограмм.

- 1. Ghebremichael F., Andersen G.P., Gurley K.S. Holography-based wavefront sensing // Appl.Opt. 2008. V.47. №4. P.A62-A69.
- 2. Dong S., Haist T., Osten W., et al. Response analysis of holography-based modal wavefront sensor // Appl. Opt. 2012. V.51. №9. P.1318-1327.
- 3. Bhatt R., Mishra S.K., Mohan D., Gupta A.K. Direct amplitude detection of Zernike modes by computer-generated holographic wavefront sensor: Modeling and simulation // Optics and Lasers in Engineering. 2008. V.46. №6. P.428–439.
- 4. Zepp A., Gładysz S., Stein K. Holographic wavefront sensor for fast defocus measurement // Advanced Optical Technologies. 2013. V.2, №5-6. P.433–437.
- 5. Podanchuk D., Kurashov V., Goloborodko A., et al. Wavefront sensor based on the Talbot effect with the precorrected holographic grating // Appl.Opt. 2012. V.51. №10. P.C125-C132.
- 6. Dudley A., Milione G., Alfano R.R., Forbes A. All-digital wavefront sensing for structured light beams // Optics Express. 2014. V.22. №11. P.14031-14040.

Ю Г ЯКУШЕНКОВ

Московский государственный университет геодезии и картографии

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Для качественной работы любой оптико-электронной системы (ОЭС) важно обеспечить определенные соотношения между полезным сигналом и шумом, источники которого могут быть как внутри системы, так и вне ее. Нахождение этих соотношений и на их основе некоторых важнейших параметров и характеристик ОЭС составляет главное содержание обобщенной методологии проектирования ОЭС на первых этапах ее создания. В докладе кратко описываются основные составляющие этой методологии - этапы проведения энергетического расчета, позволяющие найти важнейшие параметры оптической системы (площадь входного зрачка, относительное отверстие и угловое поле), определить необходимое значение порогового потока или обнаружительной способности приемника излучения, сформулировать требования к источнику излучения, определить ряд требований к сканирующей системе и электронному тракту ОЭС.

Yu.G. YAKUSHENKOV

Moscow state university of geodesy and cartography

GENERAL METHODOLOGY FOR CALCULATION THE ELECTRO-OPTICAL DEVICES' BAISIC PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

It is important to provide with certain correlation between useful signal and outside and inside noises for anyone electro-optical device (EOD). Determination of these correlations and some the most important EOD parameters and characterizations is the main content of general methodology during the first stage of EOD designing. In the paper it is described shortly the main parts of the general methodology – the studies of radiant energy calculations which make it possible to define the main optical system parameters (entrance pupil area, focal ratio, angular field of vision), the detectivity and the noise equivalent power of radiation detector, the parameters of scanning systems and electronic blocks of EOD.

Для качественной работы любой оптико-электронной системы (ОЭС) важно обеспечить определенные соотношения между полезным сигналом и шумом, источники которого могут быть как внутри системы, так и вне

ее. Соотношения между уровнями полезного сигнала и шумов могут быть рассмотрены для любой точки структурной схемы прибора. Однако наиболее часто на первых этапах расчета ОЭС они определяются либо для входа системы, либо для выхода системы первичной обработки информации (СПОИ). В первом случае рассматривается соотношение между потоками $\Phi_{\rm BX}$ или облученностями $E_{\rm BX}$ на входном зрачке приёмной оптической системы и порогом чувствительности ОЭС ($\Phi_{\rm II}$ оэс), эквивалентным уровню шумов и помех, приведенных ко входу. Во втором случае сигналы $u_{\rm C}$ и шумы $u_{\rm II}$ приводятся к выходу электронного тракта СПОИ. Примеры подобного рода рассмотрены в [1-2].

Основными этапами обобщенной методологии расчета ОЭП являются:

- 1. Составление энергетической модели ОЭС для выбранного или заданного сценария ее работы, включающей различные излучатели (цель, помехи, фоны, среда распространения оптического сигнала; их взаимное расположение и другие факторы).
- 2. Составление в общем виде основного энергетического уравнения (или неравенства), устанавливающего необходимое для качественной работы прибора соотношение между полезным сигналом, шумом и помехами и являющегося, по сути дела, обобщенным описанием алгоритма работы ОЭС. Если это возможно, то полезной является ранжирование сигналов, приходящих на вход ОЭС от различных излучателей, и отбрасывание от дальнейшего рассмотрения малых по величине составляющих входного сигнала. Такими уравнениями могут быть: отношение сигнал-шум на входе ОЭС $\mu_{\rm вx} = \Phi_{\rm вx}/\Phi_{\rm поэс}$ или на его выходе $\mu_{\rm выx} = u_{\rm c} \ / u_{\rm m}$; условие превышения в заданное число раз μ разности между полезным сигналом $\Phi_{\rm вx}$ и сигналом от помехи $\Phi_{\rm пом}$ порога чувствительности $\Phi_{\rm п}$ оэс, т. е. $\Phi_{\rm вx}$ - $\Phi_{\rm пом} > \mu\Phi_{\rm п}$ оэс; превышение контраста K между полезным сигналом и сигналом от фона) некоторого порогового значения $K_{\rm n}$, т.е. $(E_{\rm c}$ - $E_{\rm ф})/(E_{\rm c}$ + $E_{\rm ф}) > K_{\rm n}$, где $E_{\rm c}$ и $E_{\rm ф}$ освещенности, создаваемые источником полезного сигнала и фона, соответственно, и т п

Наиболее часто $\Phi_{\text{поэс}}$ определяется путем приведения порога чувствительности (порогового потока) приемника $\Phi_{\text{п}}$ ко входному зрачку прибора, т. е. принимается, что основной составляющей внутренних шумов ОЭП является шум приемника. Для приведения $\Phi_{\text{п}}$ ко входу необходимо знать некоторый коэффициент, иногда условно называемый к.п.д. системы первичной обработки информации ОЭС – $\eta_{\text{оэс}}$, определяющий, какая доля сигнала, поступающего на вход прибора,

используется для создания полезного сигнала на выходе СПОИ. С определенным приближением можно считать, что

$$\Phi_{\text{noon}} = \Phi_{\text{n}}/\eta_{\text{oon}}$$

- 3. Представление входящих в это уравнение величин полезных сигналов, шумов и помех, т. е. $\Phi_{\rm Bx}$, $\Phi_{\rm пом}$, $E_{\rm c}$, $E_{\rm \varphi}$, $u_{\rm c}$, $u_{\rm m}$ и т.д., в виде функций параметров и характеристик излучателей, входящих в энергетическую модель; параметров передающей системы, наблюдаемого объекта, среды распространения и приемной системы. Часто на первых этапах энергетического расчета величины $\Phi_{\rm Bx}$, $\Phi_{\rm пом}$, $E_{\rm c}$, $E_{\rm p}$, $u_{\rm c}$, $u_{\rm m}$ и другие рассчитывают без учета частотных характеристик отдельных звеньев ОЭС, включая излучатель, помехи, фон и среду распространения излучения, т.е. используют их условно обобщенные или интегральные характеристики.
- 4. Выбор или расчет параметра обнаружения (величины μ), устанавливающего требуемое для качественной (надежной) работы ОЭС соотношение между сигналом и шумами [1].
- 5. Решение основного энергетического уравнения (неравенства), представленного в соответствии с п.п. 3, 4 в виде функции параметров, описывающих ОЭС и условия его работы, относительно одного или нескольких из этих параметров. Необходимость определения нескольких неизвестных параметров из одного уравнения часто затрудняет проведение расчета. При этом целесообразно пользоваться методами нелинейного программирования, например методами последовательной безусловной оптимизации функций многих переменных, а также использовать опыт предшествующих аналогичных разработок. Большую помощь здесь оказывают методы компьютерного моделирования [3].
 - 6. Выбор или расчет остальных параметров ОЭС.
- 7. Окончательный (проверочный) энергетический расчет, сводящийся часто к проверке выполнения основного энергетического уравнения после окончательного выбора или определения всех входящих в него величин.

- 1. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник/ 6-е изд., перераб. и доп. М: Логос, 2011.
- 2. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения: учебник/ 2-е изд., перераб. и доп. М: Логос, 2013.
- 3. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения/ под ред. Ю.Г. Якушенкова, М.: Логос, 2011.

Э НИППОЛАЙНЕН

Университет Восточной Финляндии, Куопио, Финляндия

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗЫ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ

В данной работе рассмотрен экспериментальные метод по исследованию относительной фазы пульсации крови во время одного сердечного цикла, которые представляют важную биомедицинскую информацию.

E. NIPPOLAINEN

University of Eastern Finland, Kuopio, Finland

IMAGING OF RELATIVE PHASE OF BLOOD PULSATION

In this study presented experimental results, which show that the relative phase of blood pulsations is very important channel of biomedical information.

Визуализация и мониторинг микроциркуляции крови в живых тканях сердечного шикла имеет важное значение. биомедицинских исследований, так и для клинической практики. В последние десятилетия были разработаны И нашли клиническое применение оптические неинвазивные методы исследования микроциркуляции, основанные на сравнительном анализе контрастности картин лазерного излучения, лазерного доплеровского кровотока (лазерная допплеровская мониторинга флоуметрия), инфракрасной термографии. Использование данных методов позволяет с высокой точностью визуализировать микроциркуляцию крови в живых представленные являются тканях. Однако, системы инерционными и, кроме того, позволяют получать информацию только об амплитуде перфузии крови, полностью исключая возможность регистрации фазовых характеристик пульсации крови. Вместе с тем, данные о моменте достижении фазы систолы (или диастолы) кровеносных сосудов во время пульсации крови в живых тканях в течение одного сердечного цикла содержат важную информацию о характере процессов кровоснабжения, включая динамику достижения кровотоком различных областей и участков тела, особенности микроциркуляции крови в отдельных областях и ее взаимосвязи с автономной нервной системой. Получение такой информации позволило бы установить взаимосвязь между сосудистой и автономной нервной системами, а также зависимость кровоснабжения от состояния организма, более полно исследовать

происходящие в нем физиологические процессы, и, как результат, обеспечить более точное диагностирование. При этом важно обеспечить получение такой информации в режиме реального времени, что в частности актуально для визуально-информационного обеспечения хирургических операций, особенно в области сосудистой хирургии.

В данной работе предложено осуществлять визуализацию пульсации кровотока в живых тканях человека за счет цифровой обработки картин рассеяния светового излучения, регистрируемых в течение каждого сердечного цикла с помощью цифровой камеры. Для этого исследуемый объект (например, ладонь, лицо или любая другая часть тела), освещается поляризованным моно- или полихроматическим излучением с высокой временной стабильностью. Поляризационная фильтрация рассеянного излучения позволяет выделить ту его часть, которая несет информацию о пульсации крови, при этом излучение, рассеянное поверхностью, блокируется. Регистрации рассеянной на живых тканях световой волны производиться с использованием ПЗС-матрицы, расположенной в отражательной геометрии предмета освещения. В этом случае, цифровая камера фиксирует интенсивность света сразу во множестве точек картины рассеяния. Временная модуляция значений каждого пикселя при этом ассоциируется с пульсацией крови. Однако, регистрируемая амплитуда временных модуляций интенсивности оказывается очень низкой по сравнению с ее средним значением, что требует применения специальных изображений обработки для построения распределения амплитуды пульсации крови. Для построения картин пространственного распределения пульсаций крови был применен метод симплификации. основанный на синхронном детектировании интенсивности каждого пикселя матрицы видеокамеры, регистрирующей кровеносными сосудами. рассеянное Данный позволяет повысить отношение сигнал/шум и получить достоверную информацию об амплитуде и частоте пульсации крови в течение каждого физиологической неустойчивости В условиях параметров исследуемого объекта. Уникальным преимуществом и особенностью предложенного метода визуализации пульсаций крови является возможность синхронной регистрации помимо амплитуды пульсаций ещё и относительной фазы пульсаций крови в реальном масштабе времени. Поскольку фазовые параметры пульсации крови до настоящего времени не исследовались, ожидается, что результаты данного исследования позволят получить значимые научные данные, связанные с анализом и мониторингом процессов в кровеносной системе.

А.А. КУТАНОВ, И.А. СНИМЩИКОВ, С.У. НУРБЕК

Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДОЭ НА ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Представлены результаты прямой лазерной записи на пленках аморфного кремния нанесенных на стеклянную подложку излучением зеленого лазера с λ =532 нм и одномодового BluRay лазера с λ = 405 нм. Показано формирование рельефа записи в пленке аморфного кремния и ее просветление при воздействии лазерного излучения. Измерение рельефа записи показало, что под действием лазерного излучения в пленке аморфного кремния образуется рельеф высотой 20 - 30 нм. Прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния без применения мокрой химической обработки перспективна для интерференционной литографии, создания голографического принтера и записи дифракционных оптических элементов.

A.A. KUTANOV, I.A. SNIMSHIKOV, SYDYK ULUU NURBEK

Institute of physical and technical problems and material science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

DIRECT LASER RECORDING OF DOE ON a-Si FILM

Results of direct laser recording on amorphous silicon film by laser with wavelength $\lambda=532\,$ nm and Blu Ray single mode laser diode with $\lambda=405\,$ nm are presented. Measurements of a-silicon film transmission spectrum before and after exposure by focused laser beam shows the refractive index change of recording media under laser radiation interaction. It proves transformation of amorphous silicon to crystalline silicon under laser radiation interaction. Measurement of recorded relief shows that under laser radiation interaction to a-silicon layer relief depth is about 20-30 nm. Microstructures with a size of 5–7 μ m are recorded by 120mW single mode Blu Ray laser diode with $\lambda=405\,$ nm. Use of Blu Ray laser diodes for recording on amorphous silicon film opens opportunities to design compact holographic printer for DOE fabrication and lithography.

Поглошение света в тонких пленках a-Si.

Исследованы спектры поглощения образцов с различной толщиной слоя a-Si (рис. 1). Видно, что максимум поглощения света приходится на область длин волн 340...360 нм. На основе проведенного исследования следует, что для записи на слоях a-Si наиболее предпочтительно

использовать лазеры с длиной волны 355 нм и 405 нм. Особый интерес представляет использование мощных одномодовых полупроводниковых «блюрэй» лазеров с длиной волны 405 нм, имеющих компактный размер и удобных в управлении от компьютера.

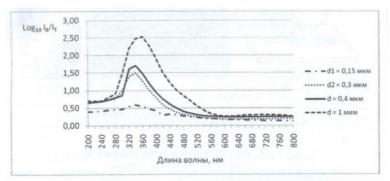


Рис. 1. Спектры поглощения в пленках a-Si различной толщины

Исследование возможностей прямой лазерной записи на слое аморфного кремния излучением лазера с λ =532нм.

Выбор лазера для прямой записи на пленках аморфного кремния является важным вопросом, так как это влияет на качество записи и характеристики устройства. Ранее, авторами была продемонстрирована возможность записи точечных голограмм излучением импульсного ультрафиолетового лазера на длине волны 355нм. Спектры поглощения пленок a-Si различной толщины (рис. 1) показывают возможности прямой лазерной записи на пленках аморфного кремния лазерным излучением с различными длинами волн.

Результаты эксперимента наглядно показывают, изменение пропускания слоя аморфного кремния после экспонирования его лазерным излучением. Слой а-кремния просветляется под воздействием лазерного излучения. Под действием сфокусированного излучения лазера происходит локальное изменение коэффициента преломления пленки кремния при его экспонировании. Происходит фазовый переход акремния из аморфного состояния в кристаллическое с увеличением объема. Измерение рельефа записи показало, что под действие лазерного излучения в пленке аморфного кремния образуется рельеф высотой 20 -30 нм.

Прямая лазерная на пленках аморфного кремния без запись обработки применения мокрой химической перспективна ДЛЯ интерференционной литографии, записи дифракционных оптических элементов. Возможность создания голографического принтера использованием цифрового микрозеркального устройства будет обсуждена (рис. 2).

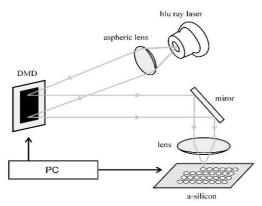


Рис. 2. Оптическая схема цифрового голографического принтера для записи дифракционных оптических элементов на a-Si

- 1. Полещук А.Г., Корольков В.П., Маточкин А.Е., Малышев А.М., Кутанов А.А., Макаров К.В., Макаров В.П., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Нурбек Микроструктурирование оптических поверхностей. Устройство прямой записи // Автометрия. 2010.
- 2. Poleshchuk A.G., Kutanov A.A., et al. Microstructuring of optical surfaces: Technology and device for direct laser writing of diffractive structures // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2010. V.46. No.2. P.171–180.
- 3. Kutanov A.A., Snimshikov I.A. Direct laser recording of dot holograms on a-Si film // Proceeding Optics&Photonics. Japan, 2011. P.30aCS2.

П.С. ГОНЧАРОВА, В.В. КРИШТОП, А.В. СЮЙ, Н.М. КИРЕЕВА, Ю.В. ПОНОМАРЧУК, А.И. ЛИВАШВИЛИ, Т.Н. КОРНЕЕНКО

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ АНИЗОТРОПНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе показано, что взаимная ориентация оптически анизотропных кристаллов определяет спектральный состав проходящего через систему излучения. В общем случае возможны три варианта взаимной ориентации двух пластинок. При взаимно ортогональной ориентации двух пластинок достигается эффект компенсации двулучепреломления, который можно использовать для термической стабилизации электрооптических модуляторов. При параллельной ориентации две пластинки ведут себя как одна с суммарной толщиной. Самый общий случай с произвольным углом между оптическими осями пластинок является самым многообещающим, так как позволяет создавать перестраиваемые элементы произвольной эффективной толщиной. Такие системы могут быть полезны для создания перестраиваемых полу- и четвертьволновых пластинок для широкого диапазона длин волн. Приложение электрического поля позволяет создать перестраиваемый гребенчатый светофильтр для широкополосного излучения или модулятор широкополосного излучения.

P.S. GONCHAROVA, V.V. KRISHTOP, A.V. SYUY, N.M. KIREEVA, Yu.V. PONOMARCHUK, A.I. LIVASHVILI, T.N. KORNEENKO

Far Eastern state transport university, Khabarovsk

CONTROL OF OPTICAL SPECTRUM IN A FEW ANISOTROPIC ELEMENTS SYSTEM

It is shown that the relative orientation of optically anisotropic crystals determines the spectral composition of the radiation passing through the system. In general, there are three possibilities of mutual orientation of the two plates. When the two plates have mutually orthogonal orientation the compensation effect of birefringence can be reached, which can be used for thermal stabilization of the electro-optic modulators. When two plates parallel orientation behave as one with a total thickness. The most general case with any angle between the optical axes of the plates is the most promising, as it allows creating tunable elements of any effective thickness. Such systems may be useful for the development of tunable half and quarter-wave plates in a wide range of wavelengths. Application of an electric field allows creating tunable comb filter for broadband radiation or broadband light modulator.

Двулучепреломляющие кристаллы широко используются изготовления оптических элементов, позволяющих управлять состоянием поляризации излучения. В частности, полу- и четвертьволновые пластинки позволяют менять состояние поляризации и широко используются, например, в устройствах электрооптической модуляции света [1, 2]. Из-за того, что такие пластинки имеют дисперсию показателя преломления, для каждой определенной длины волны необходима пластинка определенной толщины. Кроме того, изготовление таких пластинок трудоемкий процесс, требующий прецизионных методов обработки и контроля кристаллов [3].

В работе приводятся результаты исследования, показывающие, что подбирая ориентацию плоскостей пропускания поляризаторов и главных сечений кристаллов можно значительно изменять спектр исходного широкополосного излучения (по характеру огибающей, интенсивности линий, расстоянию между ними).

Для монохроматического излучения имеется возможность формировать оптическую систему, идентичную четверть- или полуволновой пластинке для любой длины волны выбранного диапазона длин волн за счет изменения угла между оптическими осями элементов.

Приложение электрического поля, кроме того, позволяет не только преобразовывать полученные спектры, но и модулировать их по интенсивности, что может служить основой для создания электрически управляемых оптических фильтров и затворов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-07-00615\14 а.

- 1. Лопатина П.С., Криштоп В.В., Строганов В.И., Сюй А.В., Максименко В.А., Толстов Е.В., Литвинова М.Н. Электрооптическая модуляция широкополосного излучения с гауссовым распределением амплитуды по спектру // Оптика и спектроскопия. 2012. Т.113. №2. С.219-221.
- 2. Криштоп В.В., Гончарова П.С., Киреева Н.М., Карпец Ю.М., Ефременко В.Г., Литвинова М.Н. Температурно-независимый модулятор излучения на кристалле ниобата лития // Фундаментальные исследования. 2012. №11. С.1233-1235.
- 3. Syuy A.V., Shtarev D.S., Krishtop V.V., Kireeva N.M. Conformity check of thickness to the crystal plate $\mathcal{N}4$ ($\mathcal{N}2$) // Journal of Spectroscopy. 2013. V.2013. P.875809.

Н.П. ПОДОЛЯН 1 , Р.В. РОМАШКО 1,2 , Ю.Н. КУЛЬЧИН 1 , Э. НИППОЛАЙНЕН 3 , А.А. КАМШИЛИН 3

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток ³Университет Восточной Финляндии, Куопио, Финляндия

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ МЕТОДОМ ДВУМЕРНОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

В данной работе рассматривается зависимость амплитуды пульсации крови от возраста человека. Для измерения и вычисления амплитуды пульсаций крови в течение одного сердечного цикла применен новаторский метод визуализации пульсаций крови.

N.P. PODOLIAN¹, R.V. ROMASHKO^{1,2}, Yu.N. KULCHIN¹, E. NIPPOLAINEN³, A.A. KAMSHILIN³

¹Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok
²Far eastern federal university, Vladivostok
³University of Eastern Finland, Kuopio, Finland

STUDY OF MAXIMAL AMPLITUDE OF BLOOD PULSATIONBY 2D-PHOTOPLETHYSMOGRAPHY

In this report, the dependence of amplitude of blood pulsation from the age is studied. Novel method of blood pulsation imaging is applied formeasurement and calculation of maximal amplitude of blood pulsation during each heartbeat.

В настоящее время информация о характере процессов кровоснабжения в коже незаменима при проведении хирургических операций, для диагностики и контроля терапии в кардиологии и т.п. В этой связи, установление взаимосвязи параметров пульсаций крови с физиологическими процессами, протекающими в организме является одним из важнейших направлений исследований в медицине.

В данной работе визуализацию пульсации кровотока в живых тканях человека осуществлена за счет цифровой обработки картин рассеяния светового излучения, регистрируемых после каждого сердечного цикла с помощью цифровой камеры и специального алгоритма обработки, предложенного авторами [1].

В ходе экспериментального исследования ладонь объекта (поочерёдно: левая, затем правая) освещается высокостабильным поляризованным

излучением на длине волны 530 нм. Картина рассеянного объектом излучения, прошедшего через узкополосный фильтр, регистрируется ПЗС-матрицей. Использование поляризационной фильтрации рассеянного излучения позволяет выделить ту его часть, которая несет информацию о пульсации крови; при этом излучение, рассеянное поверхностью кожи, блокируется. Для построения картин пространственного распределения пульсаций крови используется метод симплификации, основанный на синхронном детектировании интенсивности каждого пикселя матрицы видеокамеры, регистрирующей излучение, рассеянное кровеносными сосудами [1]. Данный подход позволяет повысить отношение сигнал/шум и получить достоверную информацию об амплитуде, фазе и частоте пульсации крови в течение каждого сердечного цикла. В ходе настоящего исследования записаны экспериментальные данные с правой и левой ладони у 48 субъектов. Возраст субъектов составил от 20 до 89 лет.

Амплитуда пульсаций, показанная на рис. 1, рассчитывается как отношение размаха переменной составляющей к постоянной (в процентах). Процесс вычисления максимальной амплитуды состоит из двух этапов. На 1 этапе определяется предварительная опорная функция для синхронного детектирования, и фиксируются предварительные области с максимальной амплитудой. На 2 этапе опорная функция для окончательного построения амплитудных и фазовых карт вычисляется уже в определенной ранее области с максимальной амплитудой. Как видно из представленных на рис. 1 результатов экспериментального исследования, максимальная амплитуда пульсаций меняется в диапазоне от 0.5% до 5% и постепенно увеличивается с увеличением возраста субъекта. Таким образом, данная работа впервые позволила установить взаимосвязь амплитуды пульсаций крови с таким физиологическими процессом как старение организма.

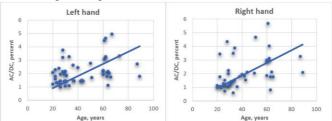


Рис. 1. Зависимость амплитуды пульсаций от возраста субъекта

Список литературы

1. Kamshilin A.A., Teplov V.Y., Nippolainen E., Miridonov S.V., Giniatullin R. Variability of microcirculation detected by blood pulsation imaging // PLoS One. 2013 V.8. P.57117.

С.Е. АЛЕКСАНДРОВ 1,2 , Г.А. ГАВРИЛОВ 1,2 , Г.Ю. СОТНИКОВА 1,2

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОДИОДНЫХ СЕНСОРОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Представлен анализ шумов сенсоров на основе A3B5 фотодиодов среднего ИК-диапазона, характеризующихся низким (от единиц Ом до кОм) динамическим сопротивлением. Показано, что дрейфовая составляющая шумов во входных цепях операционных усилителей вносит определяющий вклад в результирующие шумы таких сенсоров вплоть до частот порядка сотен кГц. Предложенный «векторный» метод описания шумовых характеристик позволяет оптимизировать элементы и оценить чувствительность сенсоров при требуемом быстродействии.

S.E. ALEKSANDROV 1,2 , G.A. GAVRILOV 1,2 , G.Yu.SOTNIKOVA 1,2

¹Ioffe physical-technical institute of the RAS, Saint-Petersburg
²Saint-Petersburg state polytechnical university

THRESHOLD SENSITIVITY OF THE MID IR SENSORS

The report presents the noise analysis of the sensors based on mid-infrared A3B5 photodiodes, characterized by low (from few Ω to $k\Omega$) shunt resistance. It is shown that the drift noise in the input amplifier circuits makes decisive contribution to the resultant noises of the sensor up to frequencies of the hundreds of kHz. The proposed "vector" noise describing method allows us to optimize the elements of the A3B5 sensors and estimate the value of their threshold sensitivity at the required speed of operation.

Интерес к использованию АЗВ5 фотодиодов [1] в ИК-измерительной технике связан не только с их высокой чувствительностью возможностью работы без дополнительного смещения, но, главным образом, с малым временем отклика (единицы нс), что позволяет создавать широкополосные измерительные устройства для регистрации постоянного уровня излучения И происходящих на быстропротекающих процессов. Пороговые значение и стабильность параметров ИК-фотодиодных сенсоров (ФДС) определяются точностью стабилизации динамического сопротивления фотодиода ограничены шумовыми параметрами современной элементной базы схем детектирования/усиления сигнала. Шум ФДС складывается из тепловых шумов ФД, определяемых сопротивлением R_d(t), и шумов операционных усилителей (OУ) по току $(\sqrt{i_{OP}}^2, A/\sqrt{\Gamma_{II}})$ и напряжению $(\sqrt{e_{OP}}^2, V/\sqrt{\Gamma_{II}})$:

$$dI_{n}(\Delta f, t) = \frac{1}{R_{d}(t)} \cdot \sqrt{\left[(i_{OP} \cdot R_{d}(t))^{2} + (e_{OP})^{2} + 4kTR_{d}(t) \right] \cdot \Delta f + \left(\frac{V_{OP_{-}P^{-}P}}{6} \right)^{2} + \left(\frac{dU_{d}}{dt} \cdot \Delta t \right)^{2}}$$

В работах [2, 3] выполнен анализ вех составляющих шумов ФДС, с разными типами ФД и ОУ. Температурный дрейф напряжения смещения на входе ОУ ,dUd/dt , и 1/f шум, описываемый параметром Vop p-p, представляют НЧ-составляющую шума, которая зависит только от диапазона изменения рабочей температуры ОУ и накладывается в виде аддитивной помехи на выходной сигнал сенсора. Вклад шумов ОУ тем существеннее, чем меньше сопротивление ФЛ и является основным фактором, ограничивающих чувствительность ИК-ФДС в широкой полосе частот детектирования. В [4] предложен наглядный «векторный» метод описания шумов ФДС с целью выбора оптимального типа ОУ для достижения предельных характеристик чувствительности сенсора при требуемом быстродействии. Анализ ОУ фирмы Analog Device показал, что наилучшая чувствительность ФЛС на основе АЗВ5 ФЛ может быть реализована на малошумящих ОУ с «нулевым дрейфом» типа AD4528 или ADA4895/96.

Предельно достижимый порог чувствительности ФДС в зависимости от сопротивления A3B5 ФД представлен в виде графиков на рис. 1 для полосы детектирования 1МГЦ и изменения рабочей температуры сенсора t_0 от $t_0 \pm 0.1$ до $t_0 \pm 40$ ° вместе с теоретическим пределом, определяемым только тепловым шумом ФД (пунктирные линии на графиках рис. 1).

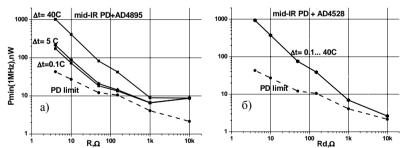


Рис. 1. Порог чувствительности сенсоров на АЗВ5 ФД и ОУ типа ADA4895 (а) и AD4528 (б) в полосе 1 МГц и изменении рабочей температуры ФДС от ± 0.1 до $\pm 40^{\circ}$

- 1. Электронный ресурс http://www.ioffeled.com, http://www.ibsg-st-petersburg.com.
- 2. Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю. // ПЖТФ. 2011.Т.37. Вып.18. С.50.
- Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю. // ПЖТФ. 2014. Т.40. Вып.16. С.58.

Н В МАСАЛЬСКИЙ

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

МЕТОД СЕЛЕКТИВНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»

Исследуется возможность селективного детектирования веществ на основе волноводной структуры «кремний на изоляторе». Приводятся экспериментальные результаты апробации метода.

N.V. MASALSKY

Scientific research institute of system researches of the RAS, Moscow

METHOD FOR SELECTIVE DETECTION OF SUBSTANCES ON BASED OF THE "SILICON ON INSULATOR" WAVEGUIDE STRUCTURE

Possibility of selective detection of substances on the basis of the "silicon on insulator" waveguide structure is researched. The experimental results of approbation of a method are given.

Волноводные структуры КНИ («кремний на изоляторе») благодаря своим свойствам (превосходные оптические характеристики, миниатюризация, стойкость в агрессивных средах) предоставляют качественно новые возможности для оптических методов детектирования жидких и газообразных веществ в широком диапазоне применений.

В данной работе обсуждается возможность реализации селективного детектирования веществ на основе КНИ волноводных структур при помощи решетчатого элемента. Функциональная схема сенсорного элемента приведена на рис. 1. Когерентное оптическое излучение от лазера вводится в волновод (2) и распространяется в нем. В присутствии исследуемого компонента (7) появляется изменение положения излученного пика, которое регистрируется линейкой фотоприемников (5). Призма (4) используется для обеспечения широкого спектра углов переизлученного света на границе волновод-покровный слой.

Выбор и оптимизация топологии волноводной КНИ структуры с решетчатым элементом подробно рассмотрена в [1]. Для структуры с толщинами: волновода - 210 нм, погруженного окисла - 940 нм, с

минимальной шириной канавки 30 нм и глубиной 100 нм максимальная эффективность связи равна 61% на длине волны 1552 нм.

Детектирование опасных и вредных веществ, например аммиака, представляет важный вопрос в современном обществе. При тестировании при заполнении канавок решетки полярными молекулами аммиака максимум углового распределения отраженного света смещается на несколько угловых минут. На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость углового положения пика интенсивности от логарифма концентрации аммиака. Важно отметить, что этот сдвиг можно легко наблюдать, фиксируя угловое положение пика интенсивности, не прибегая к спектральным приборам.

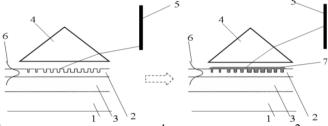


Рис. 1. Схема сенсорного элемента, где 1 - кремниевая подложка, 2 - кремниевый оптический волновод с дифракционной решеткой, 3 - слой окиси кремния, 4 - призма, 5 - линейка фотоприемников, 6 - распределение оптической моды в волноводе, 7 - исследуемое вещество. Линиями схематично показан ход оптического излучения вне волноводного компонента

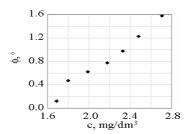


Рис. 2. Зависимость углового положения пика интенсивности от логарифма концентрации аммиака

Список литературы

1. Масальский Н.В. Высокоэффективный решетчатый элемент связи для волноводов «кремний на изоляторе» // Сб. научных трудов "Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012: II Всеросс. конф. по фотонике и информационной оптике", М.: НИЯУ МИФИ, 2013, с. 56-57.

С.Ю. КОЛЕСНИКОВ, Н.М. СКОРНЯКОВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАССЕРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА В МЕТОДЕ АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ

Работа посвящена исследованию зависимости погрешности метода анемометрии по изображениям частиц (АИЧ) от применяемых трассеров 3-х типов: полиамидные частицы, полые стеклянные сферы и алюминиевая стружка. Исследуемый поток создается путем вращения химической мешалки в объеме воды, в которую добавляются наблюдаемые маркеры. Построены поля скоростей вихрей в жидкости для двух различных насадок мешалки.

S.Yu. KOLESNIKOV, N.M. SKORNYAKOVA

National research university "Moscow power engineering institute"

USE OF TRACERS OF VARIOUS TYPE IN THE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY METHOD

Work is devoted to research of dependence of errors of the Particle Image Velocimetry method (PIV) on use as tracers of particles of 3 types: polyamide particles, hollow glass spheres and aluminum shaving. The investigated stream is created by means of rotation of the chemical mixer in volume of water, to which observed markers are added. Fields of speeds of whirlwinds in liquid are constructed for two various nozzles of the mixer.

Анемометрия по изображениям частиц (АИЧ) применяется для измерения скорости в выбранном двумерном сечении или трехмерном объеме потока в гидро- и аэродинамических экспериментах [1, 2]. Этот метод позволяет регистрировать поле мгновенного пространственного распределения скоростей. Он обладает рядом достоинств, таких как отсутствие возмущающего влияния на поток и широкий динамический диапазон измеряемых скоростей.

Точность определения параметров потока во многом зависит от светоотражающих частиц, служащих маркерами, по которым определяется скорость. Поэтому к ним предъявляются определенные требования: они должны быть достаточно большими, чтобы их можно было распознать на изображении, и в то же время достаточно маленькими и легкими, чтобы в точности следовать за потоком. В приведенном ниже

эксперименте используются 3 типа частиц: полиамидные частицы размером 10 мкм, полые стеклянные сферы диаметром 20 мкм, и алюминиевая стружка с размерами от 20 до 40 мкм. В результате мы получаем картины распространения скоростей.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.

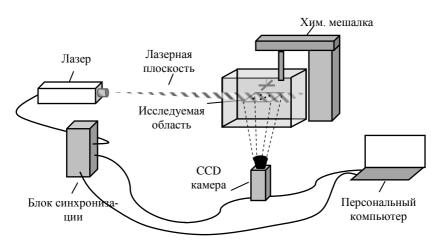


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на основе метода АИЧ

В аквариум, наполненный водой, помещается лопасть химической мешалки с определенной насадкой. Исследуемая область, находящаяся под плоскостью вращения лопастей, подсвечивается импульсным лазером со специальной оптической системой для создания «лазерного ножа». ПЗС камера, расположенная под дном аквариума, регистрирует положения частиц в моменты последовательных вспышек лазера и передает кадры на персональный компьютер, на котором происходит кросскорреляционная обработка изображений.

Работа выполнена по гранту РФФИ 13-07-00929 А.

- 1. Скорнякова Н.М., Ринкевичюс Б.С. Оптические методы диагностики микропотоков // Оптические методы исследования потоков 2009. Сборник трудов МНТК. М.: Изд. дом МЭИ, 2009.
- 2. Adrian R.J. Twenty years of particle image velocimetry $/\!/$ Experiments in Fluids. 2005. V.39. P.159–169.

В.И. БУСУРИН, Ф.А. ТУАН, П.С. АХЛАМОВ

Московский авиационный институт (наииональный исследовательский университет)

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

Исследован одноосевой микрооптоэлектромеханический (МОЭМ) преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), позволяющий измерить угловую скорость с высокой чувствительностью и стабильностью в диапазоне, достаточном для использования в подвижных авиационных системах. Определен эффективный диапазон измерения и проведен анализ погрешностей МОЭМ-преобразователя угловых скоростей.

V.I. BUSURIN, PHAM ANH TUAN, P.S. AKHLAMOV

Moscow aviation institute (National research university)

CHARACTERISTICS AND ERRORS OF MICROOPTOELECTROMECHANICAL ANGULAR VELOCITY TRANSDUCER BASED ON OPTICAL TUNNELING EFFECT

The article analyzes the model of uniaxial optical microelectromechanical (MOEM) angular velocity transducer based on optical tunneling effect, which enables measurement of the angular velocity with high sensitivity and stability, sufficient for use in the navigation systems. The effective measuring range for maximal sensitivity is defined, the relative errors of the MOEM angular velocity transducer are calculated and estimation of the multiplicative error of the temperature is performed.

Угловую скорость с высокой чувствительностью возможно измерить с помощью МОЭМ преобразователя, который может быть построен на основе источников излучения (ИИ), призмы полного внутреннего отражения из кварца, чувствительного элемента (ЧЭ) в виде балки из пьезокерамического материала с дополнительной массой, закрепленной посередине, фотоприемников (ФП) и блока обработки (БО) с применением двух каналов считывания выходных оптических сигналов. Такое конструктивное решение с применением высокочувствительной схемы съема информации об угловой скорости на основе ОТЭ позволяет

развязать цепи возбуждения ЧЭ и съема информации, снизить погрешность, обусловленную изменением конструктивных параметров преобразователя при повышенных температурах и обеспечить большую чувствительность во всем диапазоне измерений [1]. По итогам выбора пьезоматериала (цирконата-титаната свинца ЦТС-19), из которого изготовлен ЧЭ с размерами: длиной l=10 мм, толщиной $h_m=60$ мкм, шириной $b_m=1$ мм, основных параметров излучения (показатель преломления призмы n_1 =1,46; длина волны света λ =1,3мкм; показатель преломления ЧЭ n_3 =1,46; разделительная среда – воздух (n_2 ≈1); угол θ =49°). начального $d_0 = 0.41$ падения зазора MKM, определения измерения ± 4 рад/с, эффективного диапазона получена функция преобразования (зависимость выходного напряжения от скорости) МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с двумя каналами считывания выходных оптических сигналов (рис. 1).

На основе результатов моделирования, показано, что рассматриваемая модель МОЭМ-преобразователя с двумя каналами считывания имеет функцию преобразования, обеспечивающую хорошую линейность во всем диапазоне, и ее можно использовать в последующих исследованиях.

Исследовано влияние отклонений воздушного зазора $d(\Omega z)$ и угла падения излучения θ на характеристики преобразователя. Их анализ показал, что для относительной погрешности менее 1%, отклонение воздушного зазора должно быть не более нм и угла падения излучения не более 0,2 град. Проведен анализ изменения параметров пьезокерамического материала в зависимости от изменений температуры. Исследование показало, что в диапазоне температур от -50 0 C до +150 0 C температурная погрешность составляет менее 0,1% при угловых скоростях до 4 рад/с.

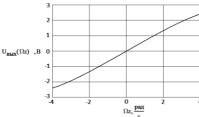


Рис. 1. Функция преобразования МОЭМ-преобразователя с двумя каналами считывания от угловой скорости в выбранном диапазоне измерения

Список литературы

1. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М.: Изд-во МАИ, 2012.

В.И. БУСУРИН, Н.Т. ЛВИН, Н.А. БЕРДЮГИН

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРЕХОСЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

В последние годы оптические измерительные приборы развиваются быстрыми темпами, в том числе для применения в инерциальных навигационных системах. Одним из таких приборов является трехосевой преобразователь ускорений на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). В работе проведен анализ погрешностей трехосевого преобразователя ускорений.

V.I. BUSURIN, NAING HTOO LWIN, N.A. BERDJUGIN

Moscow aviation institute (National research university)

ERROR ANALYSIS OF THREE AXIAL ACCELERATION TRANSDUCER BASED ON OPTICAL TUNNELING EFFECT

In recent years optical measuring instruments are developed rapidly and widely used in various fields for control of moving objects, including for use in inertial navigation systems. This article describes the error analysis of the three axial acceleration transducer based on optical tunneling effect, which allows the measurement of the acceleration in the range from -10 to +10 g.

Трехосевой преобразователь ускорений обеспечивает измерение ускорений в диапазоне от -10 до +10 g в местах установки по трем взаимно перпендикулярным осям. Конструктивно трехосевой преобразователь ускорений представляет собой совокупность трех независимых одноосевых преобразователей ускорения.

Проведен анализ погрешности, вызванной изменением пространственной ориентации летательного аппарата, погрешности, возникающей из-за изменения напряжения питания, а также погрешности нелинейности функции преобразования [1].

Зависимость абсолютной погрешности от величины измеренного ускорения при углах θ_1 =1° и θ_2 =2° показана на рис. 1. При изменении угла наклона траектории θ на 1° относительная погрешность составит не более 0,015 %. Проведена оценка чувствительности исследуемого

преобразователя к изменению напряжения и установлено, что чувствительность составляет 72 мB/g.

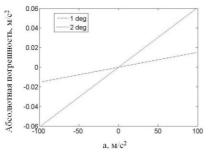


Рис. 1. Зависимость абсолютной погрешности от величины ускорения при углах θ_1 =1° и θ_2 =2°

Проведена оценка чувствительности исследуемого преобразователя к изменению напряжения и установлено, что чувствительность составляет 72 мB/g. Определено, что в диапазоне ускорений от -10 до +10 g, погрешность нелинейности составит не более 1 % и функцию преобразования можно считать квазилинейной (рис. 2).

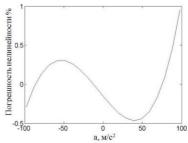


Рис. 2. Погрешность нелинейности функции преобразования трехосевого преобразователя ускорений

Результаты проведенного исследования показывают, что трехосевой преобразователь ускорения на основе ОТЭ имеет достаточный диапазон измеряемых ускорений для применения в навигационных системах пассажирских самолетов.

Список литературы

1. Zhang H., Chai W., Zeng H., Luo Q. Research on calibration method for the installation error of three-axis acceleration sensor // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS. 2011. V.11. No.04. P.6-11.

И.Б. КУТУЗА, В.Э. ПОЖАР

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ АЛМАЗОВ

В докладе представлены особенности использования акустооптических спектрометров в задачах определения свойств природных и синтетических алмазов по спектрам люминесценции и комбинационного рассеяния.

I.B. KUTUZA, V.E. POZHAR

Scientific and technological center of unique instrumentation, Moscow

APPLICATION OF ACOUSTO-OPTICAL SPECTROMETRY FOR CHARACTERIZATION AND CLASSIFICATION OF DIAMONDS

Special features of using acousto-optical spectrometers for characterization and classification of diamonds are discussed.

Совершенствование технологий производства алмазов, а так же методов возлействия на них c целью увеличения ювелирной привлекательности, расширение областей использования алмазов в различных отраслях промышленности, в том числе и инновационных, делают актуальными задачи диагностики алмазов и исследование их примесного состава. Набор примесей и дефектов в алмазе чрезвычайно широк, он и определяет многие свойства алмазов, а, следовательно, применимость и привлекательность их использования в различных промышленности. Исследование отраслях поглошения фотолюминесценции в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазонах позволяет диагностировать основные и дополнительные азотосодержащие центры. Создание специализированного спектрального оборудования, способного быстро и надежно регистрировать спектральный состав света в указанных диапазонах, является ключевым моментом при реализации новых методов диагностики алмазов.

Акустооптическое взаимодействие позволяет создавать оптические спектральные устройства в диапазоне от 250 нм до 2,3 мкм. Применение специализированных держателей для алмаза и различных источников света в сочетании с высокими оптическими свойствами самих спектрометров позволяет использовать АО спектрометры для регистрации спектров поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния. Важно, что эти спектрометры позволяют проводить диагностику во внелабораторных условиях, с помощью оптоволоконного зонда, а также числе в ювелирных изделиях.

Основным преимуществом АО спектрометров перед остальными спектрометрами является возможность работы в режиме произвольной Управление спектрометром адресации. перестраиваться из одной спектральной точки в любую другую в пределах диапазона перестройки без прохождения промежуточных точек. Такая особенность перестройки спектрометра по спектру дает возможность реализовывать различные режимы сканирования: от опроса отдельных спектральных каналов в любой последовательности до сканирования заданных участков спектра с любой плотностью точек измерения, а, следовательно, создает большие методические возможности реализации широко набора алгоритмов диагностики алмазов.

Доклад посвящен особенностям использования АО спектрометров в задачах диагностики алмазов. Сформулированы требования к устройствам, к условиям измерения и к методическому обеспечению.

- 1. Kutuza I.B., Pozhar V.E., Pustovoit V.I. Raman acousto-optical spectrometer testing // XVI European Frequency and Time Forum (EFTF). Preliminary program and Abstracts. St.Peterburg, 2002. P.199.
- 2. Кутуза И.Б., Пожар В.Э. Особенности применения акустооптических спектрометров в минералогии // 3-я Международная конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации" (ARMIMP-2009). Суздаль, 2009. С.239-244.
- 3. Ананьев Е.Г., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Акустооптические методы измерения спектров оптического излучения // Оптика и спектроскопия. 1987. Т.62. С.159-165.
- 4. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Общие свойства аппаратных функций акустооптических спектрометров // Доклады академии наук. 2006. Т.406. №1. С.40-43.

А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, А.А. ПЕЧЕНКИН, Н.А. СМИРНОВ, А.И. ЧУМАКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОСКОПИИ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ЧЕРЕЗ ПОДЛОЖКУ

Продемонстрирована возможность регистрации изображений топологии участков микроэлектронных структур через подложку. Создана экспериментальная установка для ИК-микроскопии, обоснован оптимальный выбор ее компонентов. Представлены результаты визуализации реальных приборов, выполненных по субмикронной технологии.

A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKIY, A.A. NASTULYAVICHUS, A.A PECHENKIN, N.A. SMIRNOV, A.I. CHUMAKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

NIR MICROSCOPY POSSIBILITIES FOR THE VISUALIZATION OF SILICON MICROELECTRONIC STRUCTURE TOPOLOGY THROUGH THE SUBSTRATE

The possibility of capturing the images of microelectronic structures topology through the substrate is demonstrated. An experimental setup for NIR microscopy with substantiated optimal choice of its components is worked out. An example of the results of real submicron technology devices visualization is presented.

Одним из информативных способов анализа причин возникновения и локализации дефектов (отказов) в современных СБИС является изучение свечения дефектной области при протекании через нее сверхнормативного тока. Испускание фотонов для кремниевых приборов может происходить в прямо- или обратно-смещенном p-n переходе, в транзисторе в режиме насыщения, при возникновении тиристорного эффекта («защёлки») и при пробое подзатворного диэлектрика [1]. Несмотря на различия в механизмах возникновения свечения, спектры излучения во всех упомянутых случаях содержат наиболее интенсивную часть в ближней инфракрасной области при λ >1,1 мкм, т.е. вне области

поглощения кремния, что делает возможным визуализацию топологии ИС (и изучение её возможных нарушений) даже через подложку.

современных СБИС С многослойной металлизацией выполненных по технологии Flip-Chip визуализация элементов топологии затруднена, поскольку контролируемые участки СБИС частично или полностью скрыты от непосредственных наблюдений непрозрачными в металлизации диапазоне элементами или случае видимом «перевернутого» кристалла) толстым слоем кремния (подложкой). В этом случае, единственно возможным методом дефектоскопии является микроскопия со стороны подложки. При этом на качество изображения влияет состояние обработки поверхности подложки. На результирующем ослаблении падающего, отраженного и испускаемого дефектом света сказываются толщина подложки, высокий показатель преломления кремния (за счет рассеяния, поглощения, а также отражения на границе

«подложка-воздух»).

Для регистрации изображений топологии через подложку была создана экспериментальная установка (микроскоп), оптимизированная для работы в ближней инфракрасной области спектра, в которой использованы: телецентрический ИКосветитель, две видеокамеры (отличающиеся

разрешением и спектральной чувствительностью в ближнем ИК-диапазоне), просветлённые объективы и другие оптические элементы.

подтверждения возможностей установки по визуализации топологии и локализации её дефектов на рисунке представлен снимок подложку толщиной 800мкм топологии СБИС выполненной по 40 нм технологии. В обведённой области явно просматривается свечение, соответствующее тиристорному эффекту (с питания 2.9 А), инициированному ограничением тока источника импульсом лазерного излучения [2, 3]. Данный подход был успешно использован авторами при создании экспериментального пикосекундного лазерного комплекса для моделирования одиночных радиационных эффектов космического пространства в ИС [3].

- 1. Barton D.L., Tangyunyong P., Soden J.M., Liang A.Y. // Proc. of the 22nd Int. Symp. for Testing and Failure Analysis. Los-Angeles, USA. 1996. P.9-17.
 - 2. Печенкин А.А. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннот.докл. Т.2. 2014. С.46.
- 3. Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., et al. // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. Miami, USA, 2012.

А.В. ВЕДЯШКИНА, Б.С. РИНКЕВИЧЮС

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ЗD-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КАУСТИК В ЗАДАЧАХ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Лазерная рефрактография — новый метод исследования оптически неоднородных сред, основанный на явлении рефракции структурированного лазерного излучения в оптически неоднородной среде, регистрации угла его отклонения с помощью цифровой видеокамеры и дальнейшей компьютерной обработке. Рассматриваются два вида оптических неоднородностей, в которых формируются каустики: диффузионный слой жидкости и температурные поля около нагретых или охлажденных объектов.

A.V. VEDYASHKINA, B.S. RINKEVICHYUS

National research university "Moscow power engineering institute"

3D-VISUALIZATION OF CAUSTICS' FORMATION IN LASER REFRACTOGRAPHY PROBLEMS

The laser refractography is a method of researching optically inhomogeneous media. It is based on the phenomenon of refraction of structured laser radiation in optically inhomogeneous media and registration of its deviation's angle with the digital video camera and computer processing. Two types of optical inhomogeneities, in which the caustics are formed: a diffusion layer of liquids and temperature fields near heated or cooled objects.

Один из способов решения обратной задачи метода лазерной рефракторафии [1] основан на регистрация положения каустик [2]. В работе показаны условия образования каустик в диффузионном слое жидкостей, возникающем на границе раздела двух сред с различными физическими характеристиками. Предположим, в среде, содержащей диффузионный слой, показатель преломления изменяется по следующему закону (1) [3]:

$$n(x) = n_1 + (n_1 + n_2)/\{1 + \exp[(x - x_s)/h]\},\tag{1}$$

где n_1 — показатель преломления нижней жидкости, n_2 — показатель преломления верхней жидкости, x_s — середина слоя, h — полуширина слоя.

Динамика изменения 3D-рефрактограмм при различных углах наклона плоского лазерного пучка (ЛП) в среде представлена на рис. 1. Реализована экспериментальная установка с указанными параметрами.

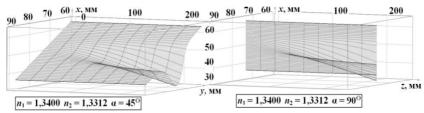


Рис. 1. Распространение лазерного пучка в диффузионном слое жидкости

Рассмотрены сферически симметричные температурные поля около нагретого шара в холодной воде и охлажденного шара в горячей. Для расчета 3D-рефрактограмм используется зависимость показателя преломления от температуры (2):

$$T(r) = T_0 + \Delta T \cdot e^{-\frac{(r-R)^2}{a^2}} \qquad n \ T = n_0 - 0,000051 \cdot T(r) - 0,0000011 \cdot T(r) \stackrel{2}{\longrightarrow} , \tag{2}$$

где T_0 , ΔT , a — параметры модели температурного поля. 3D-рефрактограммы для двух рассмотренных случаев приведены на рис. 2 и 3.

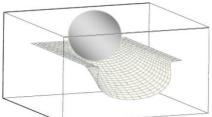


Рис. 2. Распространение лазерного пучка около нагретого шара T = 70°C в хололной воле T = 20°C

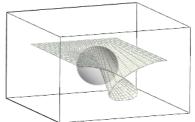


Рис. 3. Распространение лазерного пучка ЛП около охлажденного шара T=20°C в горячей воде T=70°C

Из рисунков видно, как зависит формирование каустик от параметров исследуемой среды. Разработана программа для моделирования каустик.

- 1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008.
- 2. Расковская И.Л. Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустик при использовании структурированных лазерных пучков. // Автометрия. 2014. Т.50. №5. С.92-98.
- 3. Vedyashkina A.V. Computer modeling of optical rays' refraction in inhomogeneous mediums // Journal of Beijing Institute of Technology. 2013. V.22. Supp.l.1. P.71-76.

В.В. ДУДЕНКОВА¹, Ю.Н. ЗАХАРОВ^{1,2}

¹Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского ²Harvard University, Cambridge, USA

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВаLM МЕТОДА

Для преодоления дифракционного предела при исследовании микрообъектов можно анализ мерцания флуоресценции (BaLM). Для достижения сверхвысокого разрешения и корректной работы алгоритма необходимо рассчитать оптимальную мощности возбуждения с учетом параметров флуорофора, источника освещения, а также регистрирующей цифровой матрицы.

V.V. DUDENKOVA¹, Yu.N. ZAKHAROV^{1,2}

¹Lobachevsky state university of Nizhny Novgorod ²Harvard University, Cambridge, USA

THEORETICAL CALCULATION OF OPTIMAL EXCITATION POWER TO OBTAIN SUPER RESOLUTION BY BaLM METHOD

In microscopy diffraction limit overcoming is possible with the help of the analysis of fluorescence by bleaching/blinking assisted localization microscopy (BaLM). For achievement of super resolution and algorithm correct working it is necessary to calculate optimum excitation power taking into account parameters of the fluorofor, lighting source, and also registering digital matrix.

В количественной световой микроскопии разрешающая способность является одним из важнейших параметров и существует большое количество современных подходов для увеличения этого параметра выше дифракционного предела. Для улучшения поперечного разрешения одним из перспективных является метод флуоресцентного анализа BaLM [1], основной подход которого состоит в возбуждении флуоресценции, регистрации и анализе мерцания флуорофоров. Для возбуждения флуоресценции можно использовать как широкополосное, так и когерентное лазерное излучение. Выбор источника излучения и его параметров является принципиально важным. В зависимости от спектра поглощения конкретного флуорофора, необходимо подобрать длину волны накачки λ . Для точности локализации отдельных молекул

флуорофора необходима запись серии кадров с мерцанием, т.е. фиксировать акты зажигания и гашения отдельных молекул, для дальнейшего нахождения их центров. Поэтому в расчете оптимальной мощности возбуждения должны быть учтены параметры флуорофора, источника освещения, оптических элементов схемы, а также регистрирующей цифровой матрицы.

С учетом количества участвующих молекул флуорофора, частоты кадров f регистрации и главного для BaLM метода условия — чтобы в дифракционном пятне на каждом кадре возбуждалась одна молекула флуорофора при их концентрации в образце n, мощность возбуждающего света будет равна:

$$P = \frac{3 fhcSNA^4}{2\theta_F on \lambda^4 \pi^2},$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, S — площадь освещения лазерным пучком, NA — числовая апертура используемого объектива, $\theta_{\scriptscriptstyle F}$ — квантовый выход флуорофора, σ — сечение поглощения флуорофора.

Список литературы

1. Burnette D.T., Sengupta P., Dai Y., Lippincott-Schwartz J., Kachar B. // PNAS. 2011. V.108, №52. P.21081.

А.Е. ГОРЮНОВ, П.В. ПАВЛОВ, Н.В. ПЕТРОВ 1 , А.Н. МАЛОВ 2

Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики ²Иркутский государственный медицинский университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований, проведённых с целью оценки возможности использования вихревых лазерных пучков для задач неразрушающего контроля шероховатых поверхностей.

A.E. GORJUNOV, P.V. PAVLOV, N.V. PETROV¹, A.N. MALOV²

Air Forces academy named by prof. N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin, Voronezh

¹Saint-Petersburg national research university of information technology,

mechanics and optics

²Irkutsk state medical university

THE VORTEX BEAMS USAGE FOR SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS ESTIMATION

The numerical and experimental investigation results for vortex laser beams applicability evaluating of a rough surfaces non-destructive testing.

Для повышения эффективности метода цифровой спекл-фотографии было предложено использование зондирование вихревыми волновыми фронтами [1]. Была разработана математическая модель, которая обеспечивает описание вихревых лазерных пучков, распространяющихся в свободном пространстве и их отражение от шероховатых поверхностей [2]. Однако детальное исследование, которое определит оптимальные параметры волнового фронта (длины волны, величина топологического заряда) для диагностики исследуемых поверхностей с различными параметрами неровностей не проводилось. Настоящая работа была проведена для восполнения этого пробела.

В ходе исследования моделировался процесс отражения вихревого волнового фронта с различным значением числа топологических зарядов ρ от шероховатой поверхности с различным параметром Ra. Установлено, что при большей величине топологического заряда, т.е. при

более сложной структуре волнового фронта чувствительность оптической системы к изменениям параметров шероховатой поверхности увеличивается. В результате численного расчёта было установлено, что чувствительность оптической системы увеличивается на 10%, 30% и 70% соответственно при 1, 2 и 3 топологических зарядах – ρ волнового поля [3]. На рис. 1 представлены картины распределения амплитуды и фазы зарегистрированных волновых полей с ρ =1, 2, 3 при параметрах шероховатости поверхности Ra = 2 мкм, а также графики функции автокорреляции спекл-картин, полученных при различном числе ρ .

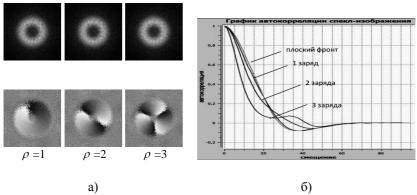


Рис. 1. Распределения амплитуды и фазы вихревого фронта, зондируемого на шероховатую поверхность (а) и графики функции автокорреляции регистрируемых спекл-картин при различном числе ρ (б)

- 1. Павлов П.В., Малов А.Н. Определение параметров шероховатости оптическинепрозрачных деталей методом спекл-структур с применением спиральных пучков // Компьютерная оптика. 2012. Т.36. №365. С.365-370.
- 2. Петров Н.В., Павлов П.В., Малов А.Н. Численное моделирование распространения и отражения оптического вихря методами скалярной теории дифракции // Квантовая электроника. 2013. Т.43 №6. C585-587.
- 3. Gorjunov A.E., Pavlov P.V., Petrov N.V. Evaluating the effectiveness of correlation digital speckle photography method for non-destructive testing of rough surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.536. P.012017.

С.Б. ОДИНОКОВ, А.Ю. ЖЕРДЕВ, М.А. РУЧКИНА Московский государственный технический им. Н.Э. Баумана

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК НА ИХ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Представлен метод анализа плазмонных решёток. Проведено математическое исследование спектрально-угловых характеристик плазмонных решётках. Выявлены зависимости формы и поведения спектрально-угловых характеристик плазмонной решётки от её геометрических параметров. Результаты математического моделирования подтверждены экспериментальными образцами.

S.B. ODINOKOV, A.Yu. ZHERDEV, M.A. RUCHKINA

Bauman Moscow state technical university

RESEARCH OF INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS ON SPECTRAL-ANGULAR CHARACTERISTICS OF THE PLASMON SPECTRAL GRATINGS

Method for the analysis of plasmonic gratings is presented. The mathematical research of the spectral and angular characteristics of plasmonic gratings is realised. The characteristics curves of the shape and spectral-angular characteristics of the plasmon grating from its geometric parameters are indicated. The results of mathematical modeling are confirmed with the experimental samples.

Плазмон – квазичастица, отвечающая квантованию плазменных колебаний, которые представляют собой коллективные колебания свободного электронного газа. Поверхностные плазмонные волны могут возникнуть на границе металл—диэлектрик. Плазмонные волны могут возбуждаться посредством падающей электромагнитной волны, если существует проекция вектора электрической напряжённости на поверхность границы металл—диэлектрик. Возбуждение плазмонных волн на поверхности дифракционной решётки с субмикронным периодом позволяет перераспределять энергию между дифракционными порядками.

В работе исследовались дифракционные решётки прямоугольного профиля рельефа на диэлектрической основе со слоем серебра в качестве металлизации как плазмонные спектральные фильтры анализировались их спектрально-угловые характеристики. В ходе исследования обнаружено

четыре различных плазмонных эффекта в спектрах пропускания или отражения структур. Характерный эффект представлен на рис. 1.

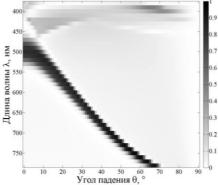


Рис. 1. Спектрально-угловая диаграмма коэффициента пропускания плазмонной дифракционной решётки

Из диаграммы можно видеть, что данная структура при ортогональном падении излучении (т.е. под углом $\theta = 0^{\circ}$) имеет такое спектральное распределение интенсивности T0 порядка коэффициент (т.е. пропускания), что в полосе длин волн от 475 до 525 нм пропускание достигает 90%, а вне этой полосы пропускание практически нулевое. При падении излучения под углом 40° максимум пропускания смещается к 700 нм, но по-прежнему составляет не менее 90%, а при падении излучения под углом свыше 70° пропускание практически полностью отсутствует за исключением полосы менее 400 нм, где пропускание достигается 35%. Таким образом из диаграммы можно заключить, что при наблюдении данной структуры на просвет и наклоне структуры на угол от 0° до 60°, структура меняет цвет от зелёного до насыщенно красного.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения № 14.577.21.0115 (идентификатор проекта RFMEFI57714X0115).

- 1. Magnusson R., Shin D., Liu Z.S. Guided-mode resonance Brewster filter // Opt. Lett. 1998. V.23. P.612-614.
- 2. Tibuleac S., Magnusson R. Reflection and transmission guided-mode resonance filters // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V.14. P.1617-1626.
- 3. Fu L., Schweizer H., Weiss T., Giessen H. Optical properties of metallic meanders $/\!/$ J. Opt. Soc. Am. B. 2009. V.26. P.B111-B119.
- 4. Ozaki M., Kato J., Kawata S. Surface-plasmon holography with white light illumination // Proceedings of SPIE. 2012. V.8455. P.84550K-6.

А.В. ПРОХОРОВ, М.Ю. ГУБИН, М.Г. ГЛАДУШ 1 , А.Ю. ЛЕКСИН, С.М. АРАКЕЛЯН

Владимирский государственный университет ¹Институт спектроскопии РАН, Троицк

ГЕНЕРАЦИЯ ДИССИПАТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЛЬ В ПЛОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Показана возможность эффективного формирования трехмерных пространственно-временных диссипативных солитонов (лазерных пуль) за счет проявления сильных эффектов локального поля в плотном ансамбле двухуровневых квантовых точек в диэлектрической среде.

A.V. PROKHOROV, M.Yu. GUBIN, M.G. GLADUSH¹, A.Yu. LEKSIN, S.M. ARAKELIAN

Vladimir state university ¹Institute for spectroscopy of the RAS, Troitsk

GENERATION OF DISSIPATIVE LASER BULLETS IN A DENSE OPTICAL MEDIUM

The possibility of effective formation of three-dimensional spatio-temporal dissipative solitons (laser bullets) due to the strong influence of local-field effects in a dense ensemble of two-level quantum dots in a dielectric medium is presented.

В настоящей работе рассмотрена задача распространения трехмерных оптических структур в плотном ансамбле двухуровневых квантовых точек, помещенных в диэлектрическую среду-носитель. Особенностью модели является учет как дисперсионных, так и диссипативных эффектов локального поля, связанных с комплексным представлением показателя преломления $n=n_R+in_I$ среды-носителя. Вклад данных эффектов пропорционален характерному параметру $\xi_0=\rho_a\mid\mu_a\mid^2/(3\hbar\varepsilon_0)$, где ρ_a – плотность, а μ_a – дипольный момент соответствующего перехода для квантовых излучателей. Наличие колоссальных значений дипольных моментов перехода для квантовых точек способно кардинально изменить картину нелинейно-диссипативных процессов в настоящей задаче и наблюдать эффект самоиндуцированной прозрачности при существенно меньших мощностях оптического поля. В адиабатическом пределе самосогласованная задача может быть сведена к пространственно-

временному уравнению распространения Гинзбурга-Ландау третьегопятого порядка:

$$\left(\frac{1}{\upsilon_{g}}\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\right)\varepsilon + \frac{i}{2}\beta_{2}\frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial t^{2}} - i\frac{D_{0}}{2}\left(\frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial y^{2}}\right) - i\gamma_{2}\left|\varepsilon\right|^{2}\varepsilon + i\gamma_{4}\left|\varepsilon\right|^{4}\varepsilon =$$

$$= -\left(\alpha_{I} - i\alpha_{R}\right)\varepsilon - \alpha_{2}\left|\varepsilon\right|^{2}\varepsilon - \alpha_{4}\left|\varepsilon\right|^{4}\varepsilon + \nu_{2}\frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial t^{2}} + d_{x}\frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial x^{2}} + d_{y}\frac{\partial^{2}\varepsilon}{\partial y^{2}}, \tag{1}$$

где коэффициенты β_2 (дисперсия групповых скоростей), γ_2 (кубической нелинейности), и др. являются функциями материальных параметров среды. Результаты поиска устойчивых решений (1) в форме $\varepsilon = A_0 \, \exp \left[i \left(C_0 X^2 + D_0 Y^2 + F_0 \tau^2 + \Psi_0 \right) - X^2 / 2 X_0^2 - Y^2 / 2 Y_0^2 - \tau^2 / 2 \tau_0^2 \right]$

представлены на рис. 1. Также обсуждается возможность генерации компактных трехмерных оптических солитонов в полностью диэлектрических метаматериалах с квантовыми точками. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания № 16.440.2014/k, а также гранта РФФИ 14-02-97511.

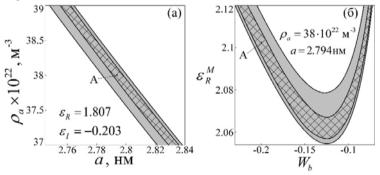


Рис. 1. Параметрические плоскости (размер квантовой точки a; концентрация допирования ρ_a) (а) и (диэлектрическая проницаемость \mathcal{E}_R^M ; разность населенностей W_b) (б) с областями устойчивости лазерных пуль в диэлектрическом материале с квантовыми точками, рассчитанные с использованием вариационного метода (серый фон) и прямым численным моделированием уравнения (косая штриховка)

В.А. МАКАРОВ, В.М. ПЕТНИКОВА, К.В. РУДЕНКО, В.В. ШУВАЛОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

АДИАБАТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕИНТЕГРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ШРЕДИНГЕРА В НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКЕ

Алгоритм решения неинтегрируемых задач взаимодействия в адиабатическом приближении описан на примере нелинейного взаимодействия «быстрой» и «медленной» кноидальных волн, а также быстрой кноидальной волны с медленным солитоном (светлым, темным и рациональным). Показано, что медленная компонента поля вызывает амплитудную и частотную модуляцию быстрой компоненты. Сформулированы условия применимости адиабатического приближения.

V.A. MAKAROV, V.M. PETNIKOVA, K.V. RUDENKO, V.V. SHUVALOV

Lomonosov Moscow State University

ADIABATIC APPROXIMATION FOR SOLVING NON-INTEGRABLE SYSTEM OF COUPLED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATIONS IN NONLINEAR OPTICS

Algorithm of solving the non-integrable interaction problems in the adiabatic approximation is described by the examples of nonlinear interaction of "fast" and "slow" cnoidal waves as well as of fast cnoidal wave with a slow soliton (bright, dark and rational ones). It is shown that the slow field component modulates the fast one in amplitude and frequency. The applicability conditions for the adiabatic approximation are determined

Неинтегрируемая система нелинейных уравнений Шредингера является базовой математической моделью в самых разных областях физики [1]. В нелинейной оптике она описывает, например, распространение плоской эллиптически поляризованной световой волны в изотропной гиротропной среде вдоль оси z [1-3]:

$$\frac{\partial A_{\pm}}{\partial z} - \frac{ik_2}{2} \frac{\partial^2 A_{\pm}}{\partial t^2} + i \left[\mp \rho_0 + \left(\frac{\sigma_1}{2} \mp \rho_1 \right) |A_{\pm}|^2 + \left(\frac{\sigma_1}{2} + \sigma_2 \right) |A_{\mp}|^2 \right] A_{\pm} = 0, \quad (1)$$

 $A_{+}(z,t)$ медленно меняющиеся амплитуды ортогональных циркулярно поляризованных компонент поля, t - бегущее время, константы: $ho_{0.1}$ - нелокальной линейной и нелинейной гирации, $\sigma_{1.2}$ локальной керровской нелинейности, k_2 - частотной дисперсии второго порядка. Поиск решений (1) в адиабатическом приближении основан на предположении возможности разделения взаимодействующих компонент поля на «медленную» (например, A_{\perp}) и «быструю» (A_{\perp}). Уравнение для A решается точно при «замороженной» компоненте A_{\perp} , затем $|A_{\perp}|^2$ усредняется по времени и подставляется в уравнение для A_{\perp} . решение последнего уравнения $A_{\perp}(z,t)$ подставляется полученное на первом шаге решение $A_{-}(z,t,A_{+})$, что и определяет амплитудную частотную модуляцию быстрой компоненты. Алиабатическое приближение применимо, пока модуляция относительно слабо искажает производные в (1) и процедуру усреднения $|A_{\perp}|^2$ по времени. На рис. 1 показан пример пространственно-временной амплитудной и частотной модуляции быстрой компоненты поля кноидальной волны $A_{-}(t,z) = r_{-}(t,z) \exp(i\kappa_{-}z),$ $r_{-}(t,z) = r_{-0}(t,z) \operatorname{cn}[\nu_{-}(t,z)t, \mu_{-}]$ медленным рациональным солитоном [3], где $\kappa_{-} = \text{const}$, $\text{cn}(x, \mu_{-})$ - эллиптический косинус с модулем μ_{-} .

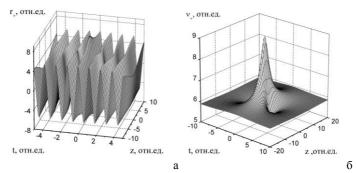


Рис. 1. Пространственно-временная модуляция $r_{-}(t,z)$ (a) и $v_{-}(t,z)$ (б)

- 1. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Laser Phys. 2014. V.24(8). 085405.
- 2. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Laser Phys. Lett. 2014. V.11(11). 115402.
- 3. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Opt. Express. 2014. V.22(22). 26607.

Е.В. КАЗАНЦЕВА 1 , А.И. МАЙМИСТОВ 1,2

¹Национальный ядерный исследовательский университет «МИФИ»
²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный

ЭВОЛЮЦИЯ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН В ЦЕПОЧКЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПРИ УЧЕТЕ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В работе описаны результаты численного моделирования взаимодействия уединенных волн в цепочке квантовых точек. Показано, что уединенные волны обладают устойчивостью по отношению к столкновениям между собой (как для волн одинаковой поляризации, так и для волн разных поляризаций). Наличие слабого диполь-дипольного взаимодействия между соседними квантовыми точками при некоторых условиях незначительно сказывается на результате взаимодействия уединенных волн.

E.V. KAZANTSEVA¹, A.I. MAIMISTOV^{1,2}

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)
²Moscow institute of physics and technology (state university), Dolgoprudny

SOLITARY WAVES IN AN ARRAY OF QUANTUM DOTS

The results of numerical simulation of solitary wave propagation in the array of quantum dots are reported. It is shown that solitary waves are stable against collisions between them (both in case of equally polarized waves and waves of different polarizations). Weak dipole-dipole interaction between neighboring quantum dots does change the solitary character of propagation of interacting solitary waves.

Исследование эффектов переноса электромагнитного излучения в низкоразмерных системах представляет значительный интерес и в настоящее время. При условии низкой плотности квантовых точек, взаимодействие их с ультракоротким электромагнитным импульсом можно рассматривать, используя в качестве модели систему уравнений Максвелла-Блоха. В работе [1] найдены аналитические решения в виде распространяющихся ансамбле *уединенных* волн, В невзаимодействующих квантовых точек; перенос возбуждения в системе осуществлялся посредством ультракороткого электромагнитного импульса, проходящего через цепочку квантовых точек. представлены некоторые результаты численного моделирования столкновений уединенных волн ансамбле взаимодействующих

квантовых точек. Система уравнений, определяющих взаимодействие компонент $e_{1,2}$ электрического поля ультракороткого импульса с поляризацией квантовой точки записана аналогично [2]:

$$i\frac{\partial e_{a}}{\partial \zeta} = -p_{a},$$

$$i\frac{\partial p_{a}}{\partial \tau} = (\delta - \Delta_{U})p_{a} + \Delta_{U}s_{a} - e_{a}n_{a} - \beta p_{a}n_{a}, i\frac{\partial n_{a}}{\partial \tau} = \frac{1}{2}(e_{a}p_{a}^{*} - e_{a}^{*}p_{a}),$$

$$i\frac{\partial s_{1}}{\partial \tau} = (\delta - \Delta_{U})s_{1} + \Delta_{U}p_{1} - e_{1}n_{3} - \beta p_{1}n_{3} + e_{2}w^{*} - e_{2}^{*}u + \beta(p_{2}w^{*} - p_{2}^{*}u),$$

$$i\frac{\partial s_{2}}{\partial \tau} = (\delta - \Delta_{U})s_{2} + \Delta_{U}p_{2} - e_{2}n_{3} - \beta p_{2}n_{3} + e_{1}w - e_{1}^{*}u + \beta(p_{1}w - p_{1}^{*}u),$$

$$i\frac{\partial n_{3}}{\partial \tau} = \frac{1}{2}\sum_{a=1,2}(e_{a}s_{a}^{*} - e_{a}^{*}s_{a}), i\frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{1}{2}(e_{1}^{*}s_{2} - e_{2}s_{1}^{*}) + \beta(p_{1}^{*}s_{2} - p_{2}s_{1}^{*})$$

$$i\frac{\partial u}{\partial \tau} = 2(\delta - \Delta_{U})u - \frac{1}{2}(e_{1}s_{2} + e_{2}s_{1} + \beta(p_{1}^{*}s_{2} - p_{2}s_{1}^{*})),$$
(1)

где параметры δ , $\Delta_U = U_a - U_{ab}$, $\beta = 2J/\hbar\omega_g$, отвечающие за отстройку от несущей частоты импульса, кулоновское отталкивание электронами на квантовой точке и обменное взаимодействие (перенос заряда) между соседними точками. Частное решение системы (1) было найдено в той же работе [2] для случая циркулярно поляризованной волны e_1 (при этом $e_2 = 0$). Амплитуда и длительность импульса, соответствующего решению (1) виде уединенной характеризуются параметром α . начальное местоположение параметром τ_0 .

В численном исследовании устойчивости уединенных волн при распространении и взаимодействии, величина параметра α для импульсов бралась в интервале от 1 до 4. Параметры заданы следующим образом: $\delta=1$, $\Delta_U=0$, величина $\beta=0\div 1$. На рис. 1 и 2 приведены примеры взаимодействия двух однополярных уединенных волн, соответствующих разным компонентам поляризации: e_1 соответствует импульс, характеризуемый параметром $\alpha=2$, а e_2 соответствует импульс с $\alpha=1$. На рис. 1 показан пример распространения импульсов разных поляризаций в том случае, когда взаимодействие между e_1 и e_2 отсутствует, а для рис. 2 характеризуется параметром $\beta=0,25$.

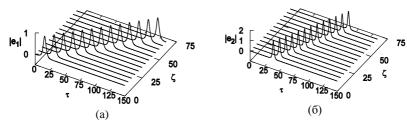


Рис. 1. Распространение импульсов положительной полярности, характеризуемых значениями $\alpha = 2$ (рис. 1a) и $\alpha = 1$ (рис. 1б). Параметр $\beta = 0$

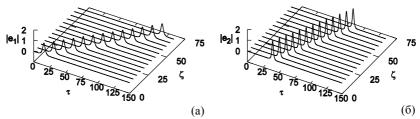


Рис. 2. Распространение импульсов положительной полярности, характеризуемых значениями $\alpha=2$ (рис. 2a) и $\alpha=1$ (рис. 2б). Параметр $\beta=0,25$

В работе проведено численное моделирование взаимодействий между импульсами, соответствующими циркулярно поляризованным поляритонам [2] в модели взаимодействия ультракороткого импульса с цепочкой квантовых точек. Показано что при $U_a = U_b = U_{ab}$ (т.е. одинаковом кулоновском отталкивании между электронами на квантовой точке в зоне проводимости a и валентной зоне b) уединенные волны обладают значительной устойчивостью к столкновениям как в случае волн одной поляризации, так и разных поляризаций. Исследование частично поддержано РФФИ (грант № 12-02-00561) и Федеральной целевой программой "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

- 1. Елютин С.О., Казанцева Е.В., Маймистов А.И. // Оптика и спектроскопия. 2001. Т.90. №3. С.501-508.
 - 2. Маймистов А.И. // Оптика и спектроскопия. 2002. Т.93. №1. С.49-55.

И.В. РЫЖОВ, А.А. ВОЛОШИН, Н.А. ВАСИЛЬЕВ, И.С. КОСОВА, В.А. МАЛЫШЕВ 1,2

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

> ¹Санкт-Петербургский государственный университет ²Университет Гроненгена, Нидерланды

СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ ДИККЕ: ОТ РЕГУЛЯРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ К ХАОСУ

сверхизлучения Теоретически исследованы режимы Дикке трехуровневых излучателей $(\Lambda$ -cxema) высокодобротном шиклическом резонаторе. На основе отображений Пуанкаре показано, что возможны различные трехуровневого сверхизлучения Дикке: регулярная динамика, бифуркации и даже хаос.

I.V. RYZHOV, A.A. VOLOSHIN, N.A. VASIL'EV, I.S. KOSOVA, V.A. MALYSHEV^{1,2}

Herzen Russian state pedagogical university, Saint-Petersburg

¹Saint-Petersburg state university

²University of Groningen, Netherlands

DICKE SUPERRADIANCE: FROM REGULAR NONLINEAR DYNAMICS TO CHAOS

We investigate theoretically different regimes of Dicke superradiance of an ensemble of three-level emitters (Λ configuration of the operating transitions) placed in a cyclic high-Q cavity. It is shown, on the basis on the Poincare mapping, that different regimes of three-level Dicke superradiance can be realized: regular dynamics, quasiperiodic and even chaotic behavior.

60 лет назад Robert Dicke предсказал, что система двухуровневых атомов, приготовленных в начальный момент в возбужденном состоянии, может излучать когерентно, благодаря корреляции эмиттеров полем их же излучения [1]. Это явление получило название когерентного спонтанного излучения – сверхизлучение Dicke (СИ).

Хорошо известно, что необходимым условием существования СИ ансамбля двухуровневых излучателей является наличие начальной инверсии населённостей уровней перехода [2]. В случае многоуровневых излучателей, в частности, как рассматриваемых в данной работе трёхуровневых атомов с Λ -схемой операционных переходов, данное

ограничение не является обязательным: СИ возможно даже, когда начальная населенность верхнего уровня меньше суммарной населенности нижнего дублета (СИ без инверсии – СИБИ [3,4]). Суть эффекта состоит в следующем. Если приготовить начальное состояние нижнего дублета в виде когерентной суперпозиции, переход в которую из верхнего состояния запрещен, то ортогональная ей суперпозиция, переход в которую разрешен, оказывается при этом незаселенной. Тогда переход с верхнего уровня в это суперпозиционное состояние оказывается инвертированным при сколь угодно малой населённости верхнего уровня. Подобные системы могут быть реализованы в кристаллах, например, в матрице La F_3 , допированной ионами празеодима Pr^{+3} с тонкой структурой основного состояния [5,6]. Отметим, что в двухуровневых системах сложно, а зачастую невозможно, достичь населённости. Наличие дополнительного уровня, близкого к основному, открывает перспективу обойти эту проблему.

Результаты, полученные в данной работе:

В рамках полуклассического подхода исследовано СИ ансамбля трёхуровневых Л-атомов, пространственно однородно и изотропно распределённых в высокодобротном циклическом резонаторе, без учёта релаксации населённости и поляризованности, диссипации, связанной с другими (кроме СИ) процессами, а также потерей энергии поля СИ вбок. Получены законы сохранения, позволяющие понизить размерность фазового пространства модели ($R^{11} \rightarrow R^5$). В случае вырождения нижнего найдено отображение, позволяющее свести трёхуровневого СИ к автоколебательной модели Дуффинга $(R^5 \rightarrow R^2)$. Показана возможность процесса генерации поля СИ при любой населённости верхнего уровня даже без инверсии в целом [4-8]. Выявлена бифуркация системы при переходе из режима СИ в режим СИБИ. Исследовано стационарное состояние настоящей модели. Для данного состояния найдено уравнение потенциальной энергии для напряжённости электрического поля. На основе отображений Пуанкаре показана возможность существования как квазипериодических, так и хаотических режимов СИ. Выявлен механизм хаотизации динамической системы.

- 1. Dicke R.H. // Phys. Rev. 1954. V.93. P.99.
- 2. Benedict M.G., et. al. Super-radiance: Multiatomic Coherent Emission. Bristol: IPP, 1996.
- 3. Malyshev V.A., Ryzhov I.V., Trifonov E.D., Zaitsev A.I. // Las. Phys. 1998. V.8. P.494.
- 4. Зайцев А.И. и др. // ЖЭТФ. 1999. Т.115. №2. С.505.
- 5. Башаров А.М., и др, // ЖЭТФ. 2006. Т.129. №2. С.239.
- 6. Grigoryan G.G., et. al. // Las. Phys. 2007. V.17. No.3. P.511.

H.B. БЫКО $B^{1,2}$, A.И. МАЙМИСТО $B^{1,3}$

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва ³Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

КОНИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИЯ ОКОЛО ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОЛОЖИТЕЛЬНО И ОТРИЦАТЕЛЬНО ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СРЕД

Рассмотрено преломление образующейся при конической дифракции электромагнитной волны на границе раздела между линейками волноводов. Одна из линеек образована из волноводов с положительным, а другая – из волноводов с отрицательным показателем преломления.

N.V. BYKOV^{1,2}, A.I. MAIMISTOV^{1,3}

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

²Dorodnicyn computing centre of the RAS, Moscow

³Moscow institute of physics and technology (state university), Dolgoprudny

CONICAL DIFFRACTION NEAR BY POSITIVE AND NEGATIVE REFRACTIVE MEDIA INTERFACE

Refraction of the electromagnetic waves due to conical diffraction is treated at the interface of two waveguide arrays which are produced from positive and negative refractive index material.

У материала с отрицательным показателем преломления волновой вектор и вектор Пойнтинга электромагнитной волны направлены в противоположные стороны. Этим обусловлен ряд интересных свойств распространения волн. Наиболее ярко они проявляются в случае, когда материалы с отрицательным показателем преломления соприкасаются с материалами, имеющими положительный показатель преломления.

Электрическое поле волны, распространяющейся в системе связанных волноводов вдоль их общей оси z в случае коротких волноводов или достаточно продолжительных импульсов, описывается системой уравнений [1]

$$ig_n \frac{da_n}{dz} + \kappa_{n,n-1} a_{n-1} + \kappa_{n,n+1} a_{n+1} + i\gamma_n a_n = 0, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$
 (1)

где g_n — знак проекции вектора групповой скорости на направление оси z; a_n — нормированная амплитуда в волноводе с номером n; $\kappa_{n,m}$ — константа связи между волноводами с номерами n и m; γ_n — коэффициент поглощения волновода с номером n. Граничные условия для такой системы волноводов [2] при условии, что излучение вводится в k-ый волновод, имеет вид:

$$1 + g_n \ a_n(0) + 1 - g_n \ a_n(l) = 2\delta_{kn}, \tag{2}$$

где $\delta_{k,n}$ – символ Кронекера; l – длина массива волноводов.

Рассматривается поведение волны на границе двух полубесконечных массивов волноводов, один из которых обладает положительным, а другой — отрицательным показателем преломления. Результат решения системы уравнений (1) представлен на рис. 1.

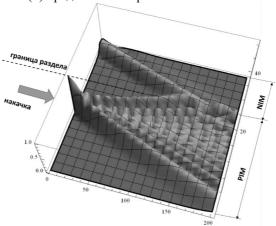


Рис. 1. Распространение волн в 50-канальной линейке волноводов с границей. Накачивается 23-й волновод, граница на 35-м волноводе

Анализ результатов показывает, что прохождение волны через границу раздела между разными типами волноводов можно уподобить преломлению света на границе раздела двух сред. В частности, с увеличением величины отношения констант связи $\kappa_{\rm OIII}/\kappa_{\rm ППП}$ синус угла наклона с нормалью уменьшается в полной аналогии с законом Снеллиуса.

- 1. Maimistov A.I., Basharov A.M. Nonlinear optical waves. Springer, 1999.
- 2. Litchinitser N.M., Gabitov I.R., Maimistov A.I. // Phys. Rev. Lett. 2007. V.99. P.113902.

Д.А. КОЗЛОВ, В.В. КОТЛЯР

Институт систем обработки изображений РАН, Самара

ПРЕОДОЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ ФОКУСИРОВКЕ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА МИКРОЦИЛИНДРОМ

В работе показано, что из аналитического решения задачи дифракции ТЕполяризованного монохроматического непараксиального гауссова пучка на однородном диэлектрическом цилиндре при радиусах цилиндра, сравнимых с длиной волны света, можно получить фокусное пятно вне цилиндра, размер которого в 2 раза меньше дифракционного предела. Было получено решение, при котором радиус диэлектрического цилиндра больше длины волны всего в два раза, но интенсивность в фокусе в 48 раз больше максимальной интенсивности падающего гауссова пучка.

D.A. KOZLOV, V.V. KOTLYAR

Image processing systems institute of the RAS, Samara

OVERCOMING THE DIFFRACTION LIMIT AT LASER LIGHT FOCUSING BY MICROCYLINDER

In this paper we provide a numerically obtained result for analytical solution for the problem of monochromatic nonparaxial Gaussian beam diffraction by uniform dielectric cylinder, which yields a focal spot outside the cylinder with linear sizes twice less than the diffraction limit in the free space in case of cylinder radius comparable with the wavelength. Although the radius of cylinder is only two times larger than the wavelength, the produced intensity in focal spot is 48 times larger than the maximal intensity of incident Gaussian beam.

Интерес к исследованиям субволновой фокусировки лазерного света микрочастицах постоянно возрастает Γ1-31. Часто устанавливается требование получить меньшее по размеру фокусное пятно (фотонную струю), что помогает на практике строить детекторы частиц с высоким разрешением. В настоящей работе представляется результат, показывающий что при помощи резонансного возбуждения в диэлектрическом микроцилиндре онжом добиться уменьшения продольных и поперечных размеров фотонной наноструи. Пример негативного двумерного распределения интенсивности для резонансного случая приведено на рис. 1.

Результаты были получены на основе аналитического решения. При облучении ТЕ-поляризованным гауссовым пучком с длиной волны 1λ и с радиусом перетяжки 6λ диэлектрического цилиндра с радиусом $2,175 \lambda$ и с n=1,59, возбуждается резонанс 19 бесселевой моды в цилиндре (рис. 1). В результате резонанса вблизи поверхности цилиндра с внутренней стороны образуется область с пиком интенсивности в 48 раз превышающим интенсивность гауссова пучка в перетяжке. В этом случае DOF (длина области по полуспаду) составляет $0,25 \lambda$, в то время как при отсутствии резонанса DOF $0,8 \lambda$; а FWHM (поперечный размер области по полуспаду) $0,2 \lambda$, а при отсутствии резонанса $0,4 \lambda$. Дифракционный предел в данном случае составляет $0,44 \lambda$ n, то есть он преодолевается даже в среде $(0,28 \lambda)$. Ширина резонанса для радиуса цилиндра всего $\Delta R = 0,003 \lambda$, таким образом, добротность резонанса $Q = R/\Delta R = 725$. Также получены подобные результаты для резонансов более низких порядков.

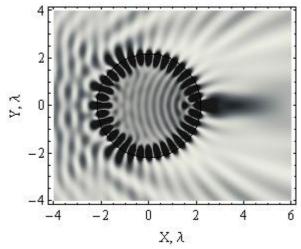


Рис. 1. Двумерное негативное распределение интенсивности света при резонансной фокусировке

- 1. Geints Y.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K. Photonic nanojet calculations in layered radially in homogeneous micrometer-sized spherical particles // J.Opt.Soc.Am. B. 2011. V.28. No.8. P.1825.
- 2. Han L., Han Y., Gouesbet G., Wang J., Grehan G. Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination // J.Opt.Soc.Am. B. 2014. V.31. No.7. P.1476-1483.
- 3. Shen Y., Wang L.V., Shen J. Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere // Opt. Lett. 2014. V.39. No.14. P.4120-4123.

В.В. ИВАХНИК, М.В. САВЕЛЬЕВ

Самарский государственный университет

ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОСТРИКЦИИ И ЭФФЕКТА ДЮФУРА ПРИ БОЛЬШИХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ОТРАЖЕНИЯ

Для четырехволнового преобразователя излучения в оптически прозрачной двухкомпонентной среде в приближении больших коэффициентов отражения проведен анализ качества обращения волнового фронта. Получены зависимости коэффициента отражения и полуширины пространственного спектра волны, отраженной таким преобразователем, от интенсивностей волн накачки и их отношения.

V.V. IVAKHNIK, M.V. SAVELYEV

Samara state university

FOUR-WAVE MIXING IN A TRANSPARENT MEDIUM BASED ON ELECTROSTRICTION AND DUFOUR EFFECT AT LARGE REFLECTANCE

Wave-front reversal quality has been analyzed for four-wave radiation converter in an optically transparent two-component medium in the approximation of large reflectance. The dependences of the reflectance and the spatial spectrum half-width of the wave reflected such a converter from the pump waves intensities and their relationship has been obtained.

Четырехволновое взаимодействие (ЧВВ) широко используется для получения волны с обращенным волновым фронтом (ОВФ) и управления ее параметрами. Важнейшей характеристикой четырехволнового преобразователя излучения является точность или качество ОВФ, которое определяется из соответствия между пространственными структурами падающей и отраженной преобразователем волн [1].

В качестве сред для получения волны с ОВФ могут использоваться реализуются многокомпонентные среды, которых механизмы нелинейности, такие как термодиффузионный и электрострикционный и др. [2, 3]. В работах [4, 5] проведен анализ пространственной структуры отраженной четырехволновым преобразователем волны двухкомпонентной приближении малого коэффициента среде

отражения. В настоящей работе рассмотрено вырожденное ЧВВ в схеме со встречными волнами накачки в оптически прозрачной двухкомпонентной среде с учетом электрострикции и эффекта Дюфура при условии больших коэффициентов отражения.

В приближении заданного поля по плоским волнам накачки при квазиколлинеарной геометрии взаимодействия получена дифференциальных **уравнений** третьего порядка, связывающая пространственные спектры падающей и отраженной четырехволновым преобразователем волн. Численное решение позволило получить и проанализировать пространственный спектр волны с ОВФ на передней грани нелинейной среды Расчет проведен для воды, содержащей наночастицы размером 10 нм, на длинах взаимодействующих волн 532 нм [2].

 \mathbf{C} ростом пространственной частоты модуль отраженной четырехволновым преобразователем волны монотонно увеличивается с последующим выходом на постоянное значение. Коэффициент отражения и полуширина полосы пространственных частот, вырезаемых таким преобразователем, с увеличением интенсивности первой волны накачки растут, при этом для небольших фиксированных значений интенсивности второй волны накачки характер роста близок к линейному. При фиксированном значении интенсивности первой волны накачки с уменьшением интенсивности второй волны накачки коэффициент отражения монотонно убывает до нуля, а полуширина полосы вырезанных четырехволновым преобразователем частот уменьшается, выходя на постоянное значение. Уменьшение полосы вырезанных пространственных частот свидетельствует об улучшении качества ОВФ.

- 1. Воронин Э.С., Ивахник В.В., Петникова В.М., Соломатин В.С., Шувалов В.В. Компенсация фазовых искажений при трехчастотном параметрическом взаимодействии // Квантовая электроника. 1979. Т.6. №6. С.1304—1309.
- 2. Ливашвили А.А., Костина Г.В., Якунина М.И. Динамика температуры прозрачной наножидкости, находящейся под воздействием периодического светового поля // Оптический журнал. 2013. Т.80. №2. С.71–74.
- 3. Доронин И.С. Иванова Г.Д., Кузин А.А., Окишев К.Н. Термодиффузия наночастиц в жидкости // Фундаментальные исследования. 2014. №6. С.238–242.
- 4. Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения с учетом термодиффузионного и электрострикционного механизмов нелинейности // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т.16. №1. С.6-11.
- 5. Воробьева Е.В., Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственно-временные характеристики четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учетом электрострикции и эффекта Дюфура // Компьютерная оптика. 2014. Т.38. №2. С.223-228.

А.С. БУСАРОВ, А.В. ВИНОГРАДОВ, Н.Л. ПОПОВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ПОЛУЧЕНИЕ И ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЙ НАКЛОННЫХ ОБЪЕКТОВ КОГЕРЕНТНЫМИ РЕНТГЕНОВСКИМИ ПУЧКАМИ

Работа относится к области когерентной отражательной оптики. Рассматривается задача получения рентгеновских изображений поверхностных структур. Представлены результаты моделирования экспериментов с существующими рентгеновскими лазерами.

A.S. BUSAROV, A.V. VINOGRADOV, N.L. POPOV

Lebedev physical institute of the RAS, Moscow

FORMATION AND TRANSFER OF IMAGES OF INCLINED OBJECTS BY COHERENT X- RAY BEAMS

This work relates to the area of coherent reflective optics. The problem of obtaining X-ray images of the surface structures is considered. The results of simulation experiments with existing X-ray lasers are given.

По мере развития когерентных источников рентгеновского излучения всё большую актуальность и распространение приобретают методы исследования материалов и поверхностных структур под малыми углами скольжения. В настоящей работе этот вопрос исследуется на качественном уровне. Используется 2D-геометрия, параксиальная оптика и идеальные оптические элементы.



Рис. 1. Постановка задачи

Постановка задачи иллюстрируется рис. 1. Когерентный пучок, распространяющийся от наклонного объекта, расположенного под углом θ к оси оптической системы попадает на детектор s'. Как должен быть расположен детектор, чтобы изображение на нём было подобно объекту? В качестве критерия подобия в когерентной оптике естественно взять подобие волновых полей на объекте и детекторе. Наш подход основан на интегральной формуле ТОИ (tilted object integral) [1]:

$$u(x,z) = \sqrt{\frac{k}{2\pi i}} \left(x \cos \theta + z \sin \theta \right) \int_{-z/\cos \theta}^{\infty} \frac{u_0(s) ds}{\left(z + s \cos \theta \right)^{3/2}} \exp \left[i \frac{k(x - s \sin \theta)^2}{2(z + s \cos \theta)} \right]$$
(1)

для поля наклонного объекта. Как и интеграл Френеля, ТОИ является точным решением параболического волнового уравнения. Поскольку, как правило, поле u_0 (x) в плоскости объекта можно считать известным лишь в его границах, то формулу (1) следует применять при z<s₀cosθ. При $z=s_0\cos\theta$ формула (1) определяет поле тени наклонного объекта в плоскости, проходящей через его правый край (смотри рис. 1) Оно служит (начальным) распределением поля для моделирования дальнейшего распространения пучка в пространстве, методом интеграла Френеля. Такой подход приводит к появлению чёткого изображения в плоскости оптически сопряжённой предмету, т. е. плоскость изображения тоже будет располагаться под малым углом к оптической оси, что скользящее падение излучения на фоточувствительную поверхность, что крайне нежелательно. Решением проблемы может быть оптическую систему ассиметричного (дифракционная решётка, кристалл и т.п.), который поворачивает пучок, после чего тот нормально падает на детектор. Полученное изображение должно быть подобно изображению, которое получалось в оптически сопряженной плоскости без отражателя. Этого можно добиться, подбирая соответствующие параметры оптической системы.

В докладе представлены формулы для расчёта положения оптических элементов, а также результаты моделирования, иллюстрирующие изложенную выше теорию.

Список литературы

1. Artyukov I.A, Mitrofanov A.N., Popov A.V., Vinogradov A.V. Theory and computation towards coherent reflection imaging of tilted objects // X-ray Lasers 2010: Proceedings of the 12th International Conference on X-ray Lasers. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. P.329-340.

П.В. КОРОЛЕНКО, Ю.В. РЫЖИКОВА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СВОЙСТВА ПАТТЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ 1D ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С МЕТАМАТЕРИАЛАМИ

Рассмотрены скейлинговые свойства 1D фотонных кристаллов на основе метаматериалов. Методом численного моделирования выявляются и анализируются особенности формирования паттерных образований в спектральных характеристиках рассматриваемых структур. Особое внимание уделено оценкам трансформации паттернов в оптических характеристиках систем различной геометрии в присутствии фазовой компенсации и с учетом дисперсионных эффектов.

P.V. KOROLENKO, YU.V. RYZHIKOVA

Lomonosov Moscow State University

PATTERN PROPERTIES IN THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF 1D PHOTONIC CRYSTALS WITH METAMATERIALS

Scaling properties of the 1D photonic crystals based on metamaterials are considered. Pattern formation features in the spectral characteristics of the structures are identified and analyzed by numerical simulation. Pattern transformation of the optical characteristics with different geometry in the presence of phase compensation and dispersion effects is regarded in detail.

Многослойные системы (1D фотонные кристаллы) с метаматериалами обладают уникальными свойствами, обусловленными наличием запрещенных зон, устойчивых к изменению наклона падающих световых волн. Такие структуры нашли применение при создании широкополосных поглотителей, реализации узкополосной фильтрации, для управления поляризацией излучения и улучшения профиля полосы пропускания интерференционных фильтров, а также в других приложениях науки и техники [1-3].

Следует отметить, что в литературе наблюдается недостаток сведений, относящихся к условиям формирования и трансформации фрактальных свойств 1D фотонных кристаллов с метаматериалами в их оптических

характеристиках. В частности, требуют дополнительной проработки вопросы о степени влияния эффекта фазовой компенсации и разброса фазовых набегов в слоях апериодических объектов на устойчивость скейлинговых свойств спектров отражения и пропускания с разной симметрией структуры. В данном докладе эти вопросы рассматриваются на основе предложенного ранее паттерного подхода, базирующегося на фиксации и определении особенностей отдельных самоподобных элементов (паттернов) [4]. Большое внимание уделяется сравнительному анализу оптических характеристик традиционных диэлектрических многослойных систем и 1D фотонных кристаллов с метаматериалами. Дисперсионные свойства метаматериалов задавались в соответствии с экспериментальными данными [5-6].

В ходе исследований оптических характеристик 1D фотонных кристаллов с различной геометрией расположения слоев было установлено, что формирование паттернов как при отрицательных, так и при положительных показателях преломления свойственно лишь структурам, у которых количество слоев разных типов неодинаково. Результаты численного моделирования указывают на то, что при выполнении определенных условий имеет место высокая степень соответствия фиксируемых паттерных образований в спектральных характеристиках традиционных диэлектрических систем и фотонных кристаллов с метаматериалами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ офи_м (грант № 14-22-01086).

- 1. Sabah C., Roskos H.G. Design of a terahertz polarization rotator based on a periodic sequence of chiral-metamaterial and dielectric slabs. // Progress In Electromagnetics Research. 2012. V.124. P.301-314.
- 2. Wen Ding-e, Yang Helin, Ye Qiwei, et. al. Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure. // Phys. Scr. 2013. V.88. P.015402-1-7.
- 3. Aghajamali A., Akbarimoosavi M., Barati M. Properties of the band gaps in one-dimensional ternary lossy photonic crystal containing double-negative materials. // arXiv:1301.4705v1 [physics.optics]. 2013. P.1-11.
- 4. Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu.V. Pattern stability in diffraction of light from structures with self-similarity symmetry. // Physics of Wave Phenomena. 2013. V.21(4). P.256-260.
- 5. Daninthe H., Foteinopoulou S., Soukoulis C.M. Omni-reflectance and enhanced resonant tunneling from multilayers containing left-handed materials. // Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications. 2006. V.4(3). P.123-131.
- 6. de Medeiros F.F., Albuquerque E.L., Vasconcelos M.S. Transmission spectra in photonic band-gap Fibonacci nanostructures. // Surface Science. 2007. V.601. P.4492-4496.

Т.В. ЯКОВЛЕВА, А.В. КНЯЗЬКОВ¹

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва ¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА СРЕДЫ

В работе рассматриваются и сопоставляются два метода определения электрооптического коэффициента среды: традиционно применяемый метод линейной регрессии и оригинальный двухпараметрический метод, основанный на совместном определении статистических параметров анализируемого сигнала.

T.V. YAKOVLEVA, A.V. KNIAZKOV¹

Dorodnicyn computing centre of the RAS, Moscow ¹Saint-Petersburg state polytechnical university

COMPARISON OF TWO TECHNIQUES OF ELECTRO-OPTICAL COEFFICIENT DETERMINATION

The paper considers and compares two techniques of an electrooptical coefficient determination: the traditional linear regression technique, and an original two-parameter technique based upon the joint estimation of the signal's statistical parameters.

Недавно был предложен метод измерения электрооптического (ЭО) коэффициента среды методом модуляции отражения из-за изменения показателя преломления ЭО эффектом под воздействием переменного электрического поля [1]. Для обработки результатов традиционно применяется метод линейной регрессии, и этот метод используется для тестирования нового так называемого двухпараметрического метода [2]. Проводится сопоставление этих двух методов и показаны некоторые преимущества двухпараметрического метода, основанного на расчете статистических параметров величины отраженной волны. Неизбежное спекл-шума отраженной волне обусловливает присутствие В стохастичность процесса, причем, как показано в [3], эффективный ЭО коэффициент представляет собой случайную величину с райсовским распределением, что дает возможность использовать разработанный для данных двухпараметрический метод, основанный измерении 2-го и 4-го моментов анализируемого сигнала [2, обозначаемый как ММ24. На рис. 1 представлена типичная гистограмма ЭО коэффициента образца кристаллического кварца: слева приведены

рассчитанные методом ММ24 значения ЭО коэффициента и стандартного отклонения σ , характеризующего гауссовский спекл-шум, а справа - результаты расчета ЭО коэффициента методом линейной регрессии, а также значение стандартного отклонения $\sigma_{\rm S}$ измеренного сигнала, которое отличается от характеристики спекл-шума σ .

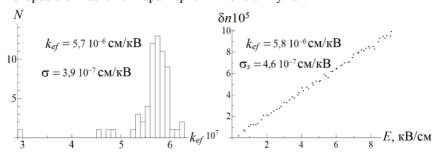


Рис. 1. Результаты вычисления величины эффективного ЭО коэффициента и дисперсии шума методом ММ24 (слева) и традиционным методом (справа)

Так как ЭО коэффициент среды определяется именно исходной, не искаженной спекл-шумом, величиной отраженной волны, то метод ММ24, разделяя неискаженную и спекл-шумовую компоненты сигнала, обеспечивает более точную оценку ЭО коэффициентов, чем метод линейной регрессии. Другое важное для практической реализации преимущество метода ММ24 состоит в том, что для расчета ЭО коэффициента достаточно проводить измерения отражения при какой-то одной величине амплитуды переменного электрического поля, не изменяя его амплитуды, что существенно упрощает схему эксперимента и сокращает число измерений.

- 1. Князьков А.В. Измерение наведенного двулучепреломления электрооптических материалов по модуляции коэффициента отражения света // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №4-1(182). С.100-104.
- 2. Яковлева Т.В. Обзор методов обработки магнитно-резонансных изображений и развитие нового двухпараметрического метода моментов // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т.6. №2. С.231-244.
- 3. Яковлева Т.В., Князьков А.В. Двухпараметрический метод моментов как инструмент оценки ЭО коэффициентов посредством периодической модуляции отраженного света // Сборник статей "Лазеры. Измерения. Информация-2014". Санкт-Петербург: Из-во Политехнического института, 2014. Т.1. С.318-326.

А.О. СЕМКИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ ФПМ-ЖК-СТРУКТУРАХ

работе дифракции развита теоретическая модель произвольно голографических поляризованных световых пучков на поляризационных дифракционных решетках, сформированных фотополимерножидкокристаллических (ФПМ-ЖК) материалах. Также приведены результаты численного моделирования.

A.O. SEMKIN, S.N. SHARANGOVICH

Tomsk state university of control systems and radioelectronics

ANALYTICAL MODEL OF LIGHT DIFFRACTION ON POLARIZATION HOLOGRAPHIC DIFFRACTION PDLC STRUCTURES

In this paper the theoretical model of arbitrary polarized light beam diffraction on the holographic polarization diffraction gratings, formed in the polymer-dispersed liquid crystals (PDLC) is developed. The results of numerical simulations are also given.

В настоящее время возрос интерес К поляризационным голографическим дифракционным решеткам (ДР), записанным фотополимерно-жидкокристаллических (ФПМ-ЖК) материалах методами поляризационной голографии [1]. Это связано с возможностью создания динамически vправляемых поляризационно-селективных фотоники и нелинейной оптики на их основе. Экспериментально получены голографические поляризационные решетки в ФПМ-ЖК на основе нематических жидких кристаллов (НЖК) [2].

Ранее [3] была разработана теоретическая модель процесса голографического формирования поляризационных дифракционных решеток двумя ортогонально поляризованными световыми пучками в ФПМ-ЖК композитах с учетом оптического поглощения.

Целью данной работы является развитие теоретической модели дифракции произвольно поляризованных световых пучков на пространственно-неоднородных поляризационных дифракционных решетках в ФПМ-ЖК композитах, управляемых электрических полем.

Векторное дифракционное поле на выходе образца ФПМ-ЖК в результате двумерной дифракция Брэгга на поляризационной амплитудно-неоднородной ДР найдено путем решения систем уравнений связанных волн (УСВ) [4] и представлено в виде суперпозиции угловых спектров собственных волн в виде:

$$\mathbf{E}_{1}(\theta, E) = \mathbf{e}_{1}^{e} H_{1}^{e}(\theta, E) \cdot E^{e}(\theta) + \mathbf{e}_{1}^{o} H_{1}^{o}(\theta, E) \cdot E^{o}(\theta), \tag{1}$$

где $E^{m}\left(\theta\right)$ – УС падающего пучка, $H_{j}^{m}\left(\theta,E\right)$ - передаточные функции ФПМ-ЖК ДР, характеризующие преобразование УС $E_{j}^{m}\left(\theta\right)$,

$$H_1^m(\theta, E) = -i \frac{b_1^m(E)}{2} \int_{-1}^{+1} \exp[-i \frac{\Delta K^m L}{2} (1-q)] \times \cosh^{-1}[c(s(1-q)/2-t)]_2 F_1(-\alpha, \alpha, 1; w) dq,$$

где $_2$ $\mathrm{F}_1ig(a,b;c;zig)$ — гипергеометрическая функция Гаусса; $\alpha=b_j^m(E),$

$$b_{j}^{m}(E) = L \cdot C_{j}^{m}(E) / \sqrt{v_{1}^{m}v_{0}^{m}} ; \quad C_{0,1}^{m}(E) = 0.25\omega \left(\mathbf{e}_{1}^{m} \langle \Delta \mathbf{\epsilon}(E) \rangle \mathbf{e}_{0}^{m} \right) \left(c_{c} \ n_{1,0}^{m} \cos \beta_{1,0}^{m}\right)^{-1} - 1$$

амплитудные коэффициенты связи; $\Delta K^m(E)$ — параметр фазовой расстройки, m=o,e — индекс, характеризующий обыкновенные и необыкновенные волны.

На основе численного моделирования по выражению (1) представлен анализ поляризационных, энергетических и перестроечных характеристик дифракционного поля от степени амплитудной неоднородности ДС, состояния поляризации считывающего поля и величины управляющего электрического поля.

Работа выполнена в рамках проектной части гос.задания Министерства образования и науки РФ (№3.878.2014/K).

- 1. Какичашвили Ш.Д. Поляризационная голография // Успехи физических наук. 1978. Т.126. №4. С.681-683.
- 2. Жаркова Г.М., Петров А.П., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М. Поляризационные голографические решетки в жидкокристаллических композитах // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2012. Т.7. N2. C.5–14.
- 3. Semkin A.O., Sharangovich S.N. Holographic formation of the polarization gratings in PDLC under light-induced absorption // Proceedings of APCOM 2014. Tokyo, Japan: Kokushikan University, 2014. P.9–12.
- 4. Устюжанин С.В., Шарангович С.Н. Аналитическая модель дифракции световых пучков на неоднородных электрически управляемых одномерных пропускающих фотонных ФПМ-ЖК-структурах // Известия вузов. Физика. 2011. №2. С.41-47.

И.В. ВАСИЛЬЕВ, А.Н. ЛОМАНОВ

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева, Ярославская обл.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПРОХОДНОЙ МОДУЛЯЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА С ОТРАЖАЮЩЕЙ ЯЧЕЙКОЙ

Представлена математическая модель оптической передающей системы для сложных фазовых распределений в поперечном профиле сигнала. В рамках данной модели предложен комбинированный численный метод расчета требуемого распределения потенциалов. Метод позволяет получать потенциалы электродов пространственных модуляторов света в зависимости от модулируемого распределения фаз.

I.V. VASILYEV, A.N. LOMANOV

P.A. Soloviev Rybinsk state aviation technical university, Yaroslavl region

MATHEMATICAL MODEL OF MULTIPASS MODULATION USING THE SLM WITH REFLECTIVE CELL

Mathematical model of multiplex transmitting optical system for signals with complex phase distribution in transverse profile presented. Within the framework of this model combined numerical method for calculating required potential distribution is proposed. Method allows to get potentials on SLM electrodes depending on modulated phase distribution.

Модуляция сложных распределений фаз и их комбинаций для нескольких исходных сигналов является актуальной проблемой для многих направлений, связанных с передачей квантованных состояний фотона, голографии, мультиплексирования информации в поперечном луча. Данную проблему предполагается профиле использованием пространственного модулятора света (ПМС). В качестве предпочтительным методом модуляции рассматривается многопроходная модуляция, в которой луч будет несколько раз проходить через жидкокристаллическую (ЖК) ячейку ПМС с отклонением от плоских или параболических зеркал (рис. 1). Это позволит минимизировать погрешности дискретизации матрицы ПМС.

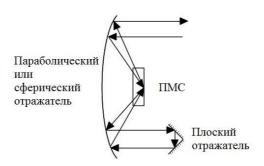


Рис. 1. Общая схема многопроходной модуляции

Математически подобная модель будет представлять дифракции фронта методом быстрого расчета поля фокуса (англ. Fast focus field calculation, FFFC) [1]. Ориентацию направляющих осей молекул жидкого кристалла в данном случае предполагается находить из численного решения уравнения свободной энергии Гиббса [2], а начальные условия брать из метода моментов для массива проводящих требуемого параллелепипедов Γ31. Для расчета распределения потенциалов, также как И ДЛЯ векторов дипольных моментов («директоров») применяется метод конечных разностей во временной области. При анализе распространения луча в области с ЖК в методе FFFC применяется представление в пространственно-частотной области для анизотропных сред [4] вместо классического преобразования Фурье.

- 1. Leutenegger M., et. al. Fast focus field calculations // Optics express. 2006. T.14. №23. C.11277-11291.
- 2. Mori H., et. al. Multidimensional director modeling using the Q tensor representation in a liquid crystal cell and its application to the π cell with patterned electrodes // Japanese journal of applied physics. 1999. T.38. No.1R. C.135.
- 3. Mehta P.D., Chakrabarty S.B. Electrical capacitance of dielectric coated metallic parallelepiped and closed cylinder isolated in free space // Journal of Electrostatics. 2013. T.71. N_24 . C.756-762.
- 4. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Интегральные представления решений системы уравнений максвелла для анизотропных сред // Компьютерная оптика. 2010. Т.34. №.1. С.52.

К.М. ЖУМАЛИЕВ, К.К. ТАЛЫПОВ, А.Д. АККОЗОВ

Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

О СИНТЕЗЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрены модели обработки аэрокосмических изображений в оптических системах. В связи с тем, что соответствующие передаточные функции в целом комплекснозначны, наилучшим способом их синтеза является голография. Нами рассмотрена и предложена двухамплитудная запись при синтезе фурье-голограмм.

K.M. ZHUMALIEV, K.K. TALYPOV, A.D. AKOZOV

Institute of physical and technical problems and material science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

ABOUT SYNTHESIS OF THE HOLOGRAPHIC OPERATION FILTERS FOR SPATIAL IMAGE PROCESSING

Models of optical process for remote sensing data had considered. Due to the fact the corresponding transfer functions in general are complex numeric – the best method of synthesis is holography. We have considered and proposal twice amplitude record in the synthesis of Fourier holograms.

Многие задачи обработки данных дистанционного зондирования были недоступными для Кыргызстана в виду отсутствия космической промышленности И собственных спутников для получения многоспектральных пространственно-распределенных данных территории. В настоящее время рынок такой информации стал открытым и доступным для Кыргызстана. Авторами разрабатывается система обработки данных и хранения данных аэрокосмической съемки территорий земной поверхности Кыргызской Республики геоинформационная система «Цифровой Кыргызстан».

Чрезвычайно большие объемы данных, необходимость оперативного извлечения информации, высокие скорости передачи данных требуют использования современных высокопроизводительных средств вычислительной техники, в том числе основанных на новых физических принципах, таких как оптические, оптико-электронные и голографические системы.

Одним из основных частей функций ГИС является записи и хранения изображений земной поверхности, поступающих с спутников. Спутниковые изображения традиционно хранятся в цифровом виде на внешних запоминающих устройствах ЭВМ.

В этой связи необходимы научные исследования по разработке голографической памяти большой емкости для записи и хранения и спутниковых изображений.

Теоретические основы данной работы заложены в [1]. Результаты исследований процессов формирования, записи, хранения изображений для развития фундаментальных основ, технологий и информационных обработки. интерпретации И хранения аэрокосмических изображений и их применений в различных задачах приводятся в докладе. Приводятся также методы синтеза голограмм и частотных фильтров для обработки изображений, алгоритмы описания программного обеспечения для систем обработки видеоинформации [2] (рис. 1.)

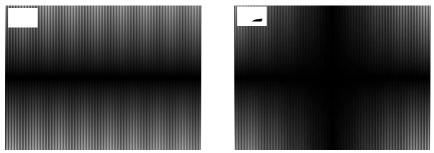


Рис. 1. Примеры синтезированных голографических фильтров

- 1. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа,1988.
- 2. Аккозов А.Д., Алымкулов С.А., Жумалиев К.М., Талыпов К.К., Абакирова Ж.А. Применение метода двухамплитудной записи цифровых голограмм при синтезе фильтров для систем оптической обработки информации с пространственно-частотной фильтрацией // Оптика и Фотоника. Бишкек, 2012. №3-4. С.3-11.

Ю.С. БЕХТИН, М.Н. ГУРЬЕВА

Рязанский государственный радиотехнический университет

БЕСПОРОГОВОЕ ВЕЙВЛЕТ-КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ШУМОМ

Предлагается алгоритм вейвлет-комплексирования искаженных геометрическим шумом чувствительности тепловизионных видеопоследовательностей ближнего и дальнего ИК-диапазонов, который основан на логической обработке вейвлеткоэффициентов пространственно-ориентированных деревьев быстрого вейвлетпреобразования. Алгоритм не содержит пороговую обработку артефактов коэффициентов, обеспечивая тем самым отсутствие комплексированном изображении смотрящего И пролонганию режима неохлаждаемых ИК-приборов до нескольких часов после калибровки.

Yu.S. BEKHTIN, M.N. GURYEVA

Ryazan state radio engineering university

NON-THRESHOLD WAVELET-BASED FUSION OF IR-IMAGES WITH FPN

The new wavelet-based algorithm for data fusion of infrared images formed by IR-sensors in different subbands of IR-spectrum and distorted by fixed pattern noise (FPN) is suggested. The algorithm is based on the logical processing of wavelet-coefficients in the form of spatial-oriented trees (SOTs) of fast wavelet transform. Due to the lack of thresholding, there are no any artifacts in the fused image. Moreover, the suggested algorithm provides with better image enhancement and prolongation of working time up a few hours for un-cooled IR-sensors before calibration.

В тепловизионных системах с матричными МФП отечественного производства до сих пор острой остается проблема компенсации геометрических темнового шумов тока чувствительности, обусловленных неоднородностью параметров ФЧЭ (до ±30 %) [1]. Алгоритм комплексирования изображений МФП ближнего и дальнего ИК-диапазонов основан на логической обработке вейвлет-коэффициентов пространственно-ориентированных деревьев (ПОД) быстрого вейвлетпреобразования (БВП) [2]. Пусть имеется L зашумленных изображений одной и той же сцены, которые получены МФП в разных участках ИКспектра и которые формируют библиотеку исходных изображений $\Lambda = \{Y^1, \dots, Y^n\}$ $Y^2, ..., Y^L$. После вычисления БВП зашумленных тепловизионных

изображений из разных поддиапазонов ИК-спектра, подвергающихся комплексированию, в одном вейвлет-базисе при заданном числе уровней (не менее трех), массивы вейвлет-коэффициентов преобразуются в виде множеств векторов ПОД:

$$\Pi O \coprod^{\iota} (j,k), \iota = 1,...,L, \ j = \overline{1,N}, \ k = \overline{1,K},$$

где N — количество ПОД изображения, K — число вейвлет-коэффициентов, образующих одно ПОД; например, для изображения размером 512×512 при Q=3 будет N=4096, K=64. Затем формируется вектор максимальных по амплитуде первых вейвлет-коэффициентов из всех ПОД, принадлежащих разным изображениям:

$$P = \max_{t} \left\{ \prod O \prod^{t} (j,1) \right\}, \ j = \overline{1,N}, \ \iota = 1,...,L.$$

нормализации вейвлет-коэффициентов ПОД выполняется усреднение вейвлет-коэффициентов, принадлежащих верхнему уровню декомпозиции. Основная идея алгоритма заключается минимальных по амплитуде вейвлет-коэффициентов из оставшихся путем применения операции поэлементного сравнения всех соответствующих ПОД из множеств ПОД. В результате поиска формируется множество ПОД из найденных вейвлет-коэффициентов с минимальной амплитудой с учетом знаков. После «денормализации», то есть умножения массива вейвлет-коэффициентов ПОД на вектор P, выполняется преобразование полученного множества ПОЛ В массив коэффициентов. Чтобы сформировать комплексированное изображение, необходимо выполнить обратное вейвлет-преобразование над новым массивом вейвлет-коэффициентов.

Результаты статистического моделирования показали эффективность предложенного метода комплексирования ПО критериям отношения сигнал-шум, индекса сходства SSIM по сравнению с двухточечной калибровкой известными алгоритмами комплексирования. Отсутствие пороговой обработки вейвлеткоэффициентов гарантирует отсутствие артефактов звона комплексированном изображении. Кроме того, выявлена возможность пролонгации смотрящего режима неохлаждаемых МФП (например, болометра) с 20 – 30 мин до нескольких часов до следующей (двухточечной) калибровки.

- 1. Кругликов С.В. Методы и средства подавления структурных помех многоэлементных фотоприемников. Аналитический обзор №4628 за 1970-1987 гг. М., 1989.
 - 2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.

П А ИВАНОВ

Ярославский государственный технический университет

РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИЗМЕНЕНИЮ МАСШТАБА, С ПОМОЩЬЮ ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Рассматривается применение инвариантных корреляционных составных фильтров в задачах корреляционного различения изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям изменения масштаба. Приводятся и анализируются результаты моделирования на ПЭВМ корреляционного распознавания двумерных полутоновых изображений.

P.A. IVANOV

Yaroslavl state technical university

SCALED INVARIANT IMAGE RECOGNITION WITH THE HELP OF INVARIANT CORRELATION FILTERS

It is presented the data about usage of invariant correlation filters in problems of scaled images recognition. There is presented data on PC modeling of 2D grayscale images correlation recognition.

Среди широкого круга задач, имеющихся в области оптической обработки информации, весьма актуальной является задача распознавания изображений, подвергнутых преобразованиям геометрии (поворот, сдвиг, изменение масштаба, различные искажения формы распознаваемого объекта и т.п.). Довольно популярным и привлекательным решением является применение оптикоэлектронных корреляторов изображений [1]. Основной функцией данного устройства является вычисление корреляционной функции изображения входного c эталоном, реализованным в виде голографического фильтра.

При корреляционном распознавании изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, выходной корреляционный пик резко деградирует при самых малейших изменениях геометрии распознаваемого объекта (за исключением преобразования сдвига, т.к. корреляционная функция обладает автоматической инвариантностью к этому типу преобразований). Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1].

Основные исследуемые на сегодняшний день алгоритмы синтеза корреляционных фильтров относятся к следующим реализациям [1]:

- 1. Алгоритмы на основе разложений входных данных в функциональные ряды (например, разложение по радиальным гармоникам Меллина, фильтр с линейными фазовыми коэффициентами и т.д.)
- 2. Алгоритмы синтеза составных фильтров на основе вычисления оптимизационного параметра (МСЭК, ГМСЭК-фильтры и т.д.).
- 3. Алгоритмы, в основе которых лежит синтез фильтра на основе ядер интегральных преобразований (вейвлет-преобразования и т.д.).

Весьма привлекательным подходом для решения задач распознавания изображений, подвергнутых преобразованиям геометрии, являются алгоритмы синтеза фильтров на основе вычисления оптимизационного параметра, в первую очередь, фильтров с минимальной средней энергией корреляции (МСЭК) и их модификаций [1].Вид фильтра представлен выражением (1):

$$h = D^{-1}X(X^{+}D^{-1}X)^{-1}u$$
 (1)

Здесь X — матрица, ее элементы есть абсолютные величины преобразования Фурье исходного изображения, D — диагональная матрица, на главной диагонали которой стоят величины квадрата абсолютных величин преобразования Фурье исходного изображения, Uвектор распознаваемого объекта, его элементы равны 1, "+" — обозначает операцию транспонирования матрицы. Размерность матриц равна разрешению (в пикселях) поданного на вход изображения.

В качестве среды моделирования был выбран пакет Matlab Mathworks, как наиболее подходящий для подобного рода задач. Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций, нормированных на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции)

Также проведено моделирование распознавания объектов, принадлежащих к разным классам ("истинные" и "ложные" объекты). Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение составных фильтров для подобного класса задач.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Appl. Opt. 1992. V.31. P.4773-4801.

М.В. КОНСТАНТИНОВ, Р.С. СТАРИКОВ, Д.В. ШАУЛЬСКИЙ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭТАЛОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ СИНТЕЗЕ ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ШУМА И ЭНЕРГИИ КОРРЕЛЯЦИИ

Приводятся результаты исследований характеристик инвариантных корреляционных фильтров в условиях реальной постановки задачи инвариантного распознавания: распознавание изображений при использовании векторных моделей трёхмерных объектов в качестве эталонной информации.

M.V. KONSTANTINOV, R.S. STARIKOV, D.V. SHAULSKIY *National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)*

USING 3D MODELS OF OBJECTS AS ETALONS FOR MINACE DISTORTION INVARIANT FILTERS SYNTHESIS

This paper presents results of research of the characteristics of invariant correlation filters in a real statement of the problem of invariant pattern recognition: recognition of images using vector models of three-dimensional objects as reference information.

Корреляционное распознавание изображений является одним из наиболее широко применяемых и перспективных инструментов для поиска, идентификации и слежения за объектами относительно сложных форм. Основой данного метода является вычисление двумерной корреляционной функции входного и эталонного изображений. Для инвариантности распознавания ΜΟΓΥΤ применяться инвариантные корреляционные фильтры (КФ), для синтеза которых необходимы заранее заготовленные обширные базы эталонных растровых изображений. Такие базы изображений могут быть получены с помощью фоторегистрации состояний объекта; поскольку на практике для обеспечения приемлемого качества распознавания значительное количество эталонных изображений (до нескольких сотен), процесс их заготовки является весьма «затратным», например по времени. В нашем исследовании использовался КФ с минимизацией шума и энергии корреляции, (КФ МШЭК) [1-2]. С целью снижения затрат на подготовку к работе фильтра, а также исследования возможностей её автоматизации опробован метод формирования набора эталонных изображений на основе векторных трёхмерных моделей. Использование данного метода дает ряд преимуществ, а именно:

- высокая скорость заготовки эталонов,
- отсутствие необходимости предобработки эталонов,
- точный контроль ракурса эталонов,
- точный контроль освещения эталонов,
- удобство работы с фонами.

Задача распознавания предполагала различение изображений «истинного» объекта от «ложных» в условиях пространственного поворота, подобно тому, как это принято в [3-5]. В качестве объектов для реализации данного метода были выбраны шесть моделей танков. Для получения изображений использовались трёхмерные эталонных векторные модели. В качестве же распознаваемых изображений использовались как изображения, полученные с помощью таких векторных моделей, так и фотографии этих объектов. Также, для оценки влияния шумового фона изображений на характеристики работы фильтра, использовались текстуры трёх типов.

В работе представлены описание метода и используемого для его реализации программного обеспечения, а также результаты, полученные в ходе моделирования распознавания.

При проведении исследования оценивались (для различных вариантов синтеза $K\Phi$): время синтеза, количество эталонных изображений, используемых при синтезе и величина ошибки, полученной в результате распознавания.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-19-01751.

- 1. Ravichandran G., Casasent D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl.Opt. 1992. V.31. No.11. P.1823-1833.
- 2. Casasent D., Patnaik R. Automated synthesis of distortion-invariant filters: AutoMinace # Proc.SPIE. 2006. V.6384. P.638401.
- 3. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.
- 4. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. MINACE filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator" // Proc. SPIE. 2013. V.8748. P.87480O.
- 5. Shaulskiy D.V., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. MINACE filter: variants of realization in 4-f correlator // Proc. SPIE. 2014. V.9094. P.90940K.

А.Ю. БЫКОВСКИЙ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

МЕТОД ОПИСАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО АГЕНТА С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНОЙ К-ЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ

Обсуждаются особенности использования k-значной алгебры Аллена-Живона для многопараметрического описания модели поведения мобильного робота.

A.Yu. BYKOVSKY

Lebedev physical institute of the RAS, Moscow

THE METHOD OF MULTI-PARAMETRICAL ROBOTIC AGENT MODELING BASED ON DISCRETE K-VALUED LOGICS

Specific features of k-valued Allen-Givone algebra are being discussed, providing its application as the multi-parametrical modelling tool for the mobile robot.

Задача построения автономных роботов, принимающих решения с помощью систем зрения и распознавания образов, может быть решена для глобальных систем управления с помощью модели гиперграфа [1], требующей мощных вычислительных систем и специальных программных средств. Однако такие методы проблематично применить в компактных и недорогих роботах.

В данной работе рассматривается альтернативная методика построения модели поведения агента на базе функций дискретной к-значной логики и эвристических знаний, формируемых в виде таблиц. Рассматриваемый способ позволяет построить единую модель пространства, времени, параметров робота и объектов сцены.

В рамках подхода многоагентных систем искусственного интеллекта используется архитектура с сетевой структурой отображений многозначно-логических функций (МЗЛФ), записываемых в рамках к-значной алгебры Аллена-Живона [2]. В качестве входных переменных для МЗЛФ используют элементы различных подмножеств $X_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{\alpha\beta\gamma\delta}$ единого множества всех переменных описания системы $X = \{x_1,...,x_N\}$, $N \in \{0,1,2,...\}$. Сложную структуру подмножеств удобно

описывать верхними $\alpha,\beta,\gamma,\delta$ и нижними $\epsilon,\zeta,\eta,\theta$, индексами, где $\alpha,\beta,\gamma,\delta,\epsilon,\zeta,\eta,\theta \in \{0,1,\dots,k-1\}$. Система принятия решений агента включает в себя "цепочки" вычислений набора многозначно логических функций $F_{\epsilon\zeta\eta\theta}^{\alpha\beta\gamma\delta}$. Например, для шкалы времени в цикле синхронизации устройств агента $\alpha=[0,T]$, переход системы из состояния $\alpha=0$ в $\alpha=1$ можно записать как ряд отображений наборов переменных $X_{\epsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma\delta} \to X_{\epsilon\zeta\eta\theta}^{1\beta\gamma\delta}$, где

$$X_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{1\beta\gamma(\delta)} = \{F_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma(\delta)}(X_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma0}), F_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma(\delta)}(X_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma1}), \dots, F_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma(\delta)}(X_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{0\beta\gamma\Delta})\}. \tag{1}$$

В указанной выше сетевой структуре отображений МЗЛФ не накладывается никаких априорных ограничений, возникающих при работе с известными моделями вычислений на графе! Система индексов при этом может быть описана низкоуровневыми средствами, удобными для микроконтроллерных платформ.

Древовидная структура отображений многопараметрических МЗЛФ вида (1) описывает «скелет» модели, управляющей всеми многозначно-логическими, булевыми и нечетко-логическими вычислениями. Для практической работы, с помощью так называемого метода консенсуса потребуется минимизировать большой набор минтермов, приводя его, по возможности, к виду

$$\begin{split} F_{\epsilon\zeta\eta\theta}^{\alpha\beta\gamma\delta}\left(x_{1}\;,\ldots,x_{n}\right) &= 1*X_{1}(a_{11},b_{11})*X_{2}(a_{12},b_{12})*\ldots*X_{n}(a_{1n},b_{1n}) + \\ &+2*X_{1}(a_{21},b_{21})*X_{2}(a_{22},b_{22})*\ldots*X_{n}(a_{2n},b_{2n}) + \end{split} \tag{2}$$

$$+(k-1)*X_1(a_{k-1,1},b_{k-1,1})*X_2(a_{k-1,2},b_{k-1,2})*\dots*X_n(a_{k-1,n},b_{k-1,n}).$$

Но чтобы гибко управлять различными подсистемами робота, необходимо обеспечить достаточно быстрый переход от общей многопараметрической формулы к набору упрощенных "образов", имеющих сниженное число переменных и число градаций этих переменных. Эту задачу можно корректно решить с помощью эвристических методик и адекватного выбора структуры МЗЛФ. Фактически, потребуется делать специальные выборки из большой таблицы числовых параметров, эквивалентной выражению (2).

- 1. Волович И.В., Хохлова М.Н. О теории моделирования и гиперграфе классов // Труды Математического института им. В.А. Стеклова. 2004. Т.245. С.281.
- 2. Быковский А.Ю., Рагер Б.Ю. Гетерогенные логические модели для систем оптоэлектронной обработки информации в многоагентных системах. Сб. тр. XII-го Всеросс. совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: ИПУ, 2014. С.3917-3928.

Д.В. ШАУЛЬСКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФИБРОСКОПАХ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

Определение способа оптического неразрушающего контроля изделия является актуальной задачей, зачастую именной визуальный анализ позволяет сделать однозначный вывод о его состоянии. Как правило большинство ключевых узлов изделий не доступно для прямого осмотра, а процесс разбора и сбора изделия для проверки узлов не желателен или даже невозможен. Также чувствительность составляющих изделия к внешним электрическим полям накладывает условие, не использования электрических компонент в системе оптического неразрушающего контроля. Реализация подобной задачи возможна с применением оптических фиброскопов.

D.V. SHAULSKIY

All-Russia research institute of automatics, Moscow

IMAGE QUALITY ENHANCEMENT IN FIBERSCOPES OF OPTICAL NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEM

Determination of optical NDT method is an important task, it is often the visual analysis leads to a clear conclusion about product condition. Usually most of the key nodes of products not available for direct examination, and the process of reviewing and collecting items for checking the nodes is not desirable or even not possible. Also, the sensitivity is the product to an external electric field imposes a condition that does not use electrical component in the optical NDT system. Implementation of such a task is possible with optical fiberscope.

Использование фиброскопов в оптических системах неразрушающего контроля позволяет исследовать и регистрировать закрытые узлы изделий. Регулярный волоконно-оптический жгут представляет собой упорядоченный набор элементарных оптических волокон плотно спаянных (упакованных) между собой на обоих концах. Характерные для регулярного волоконно-оптического жгута потери:

- 1) потеря разрешающей способности ввиду сегментации изображения торцами оптических волокон;
- 2) возможное наличие сломанных (битых) элементарных волокон, проявляющееся в частичной потере изображения.

Методы позволяющие снизить степень влияния обозначенных потерь основываются на захвате ряда изображений исследуемого объекта при смещении дистального конца фиброскопа. Из полученных изображений выбирается референтное, относительно которого программной постобработкой смещаются остальные до совпадения с референтным. Затем происходит попиксельная выборка значений изображений относящихся к объекту. В частности, в [1, 2] авторы рассчитывают смещение захваченных изображений по средствам оператора XOR.

Разработанный метод отличается способом постобработки и оценкой качества результата действия, позволяющей объективно судить о степени улучшения качества изображения и автоматизировать процесс. Для расчета значения смещения изображений используется корреляционный метод. В качестве оценки результата действия алгоритма, использовалась мера схожести SSIM [3] получаемого «улучшенного» изображения с исходным (изображение миры).

Экспериментальная апробация алгоритма подтвердила результаты моделирования. На рис. 1 заметно исчезновение битых волокон и снижение степени влияния сегментации изображения. При этом было использовано 15 изображений со смещением объекта на 30 мкм.

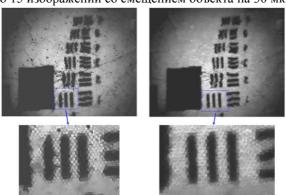


Рис. 2. Результаты эксперимента. Слева исходное референтное изображение, справа результат совмещения пятнадцати сдвинутых изображений

- 1. Kyrish M., Kester R., Richards-Kortum R., Tkaczyk T. Improving spatial resolution of a fiber bundle optical biopsy system // Proc. SPIE. 2010. V.7558. P.755807.
- 2. Ward G. Fast, robust image registration for compositing high dynamic range photographs from handheld exposures // Graphics Tools. 2003. V.8(2). P.17-30.
- 3. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Trans. on Image Processing. 2004. V.13. Is.4. P.600-612.

Т.П. КАМИНСКАЯ, И.В. КОЧИКОВ, Д.Ю. НЕЧИПУРЕНКО, В.В. ПОПОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАССЧИТАННЫХ ИТЕРАТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Для улучшения качества изображения, получаемого с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ), рассчитанных итеративными методами, предложено использовать изображения, состоящие из отдельных точек, расположенных на сетке с шагом, превышающим дифракционный размер пятна в изображении. Такой подход позволяет избавиться от нерегулярной спеклструктуры за счет формирования регулярного растрированного изображения. Приведены результаты физической реализации рассчитанных таким способом ДОЭ.

T.P. KAMINSKAYA, I.V. KOCHIKOV, D.YU. NECHIPURENKO, V.V. POPOV

Lomonosov Moscow state university

QUALITY IMPROVEMENT OF THE IMAGES OBTAINED WITH DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS COMPUTED BY ITERATIVE METHODS

For quality improvement of the images obtained with diffractive optical elements (DOE's) computed by iterative methods we suggest using the images consisting of separate points with spacing exceeding the size of diffraction spot in the image. This approach allows elimination of the irregular speckle structure; instead, a regular rasterized image is obtained. Images created by the DOE's computed and manufactured using the described approach are presented.

Основным критерием качества изображения, получаемого с помощью ДОЭ, рассчитанных итеративными методами, является нормированное среднеквадратичное отклонение интенсивности полученного изображения от заданной. При расчетах значения отклонения могут достигать значений 5-10%, что должно свидетельствовать о высоком качестве изображения. Однако при практической реализации реальное качество изображения существенно отличается от рассчитанного в худшую сторону, и главным образом за счет спекл-структуры.

При расчете итерационный алгоритм оптимизирует изображение только в узлах сетки из NxN точек. Если же рассчитать отклонение полученной интенсивности от заданной с увеличенным разрешением, например, на сетке из 2Nx2N точек, то величина отклонения возрастет в несколько раз. Например, при расчете киноформа среднеквадратичное отклонение интенсивности на сетке NxN составляло 14,8%, в то время как на более детальных изображениях оно не опускалось ниже 43%.

Причиной возникновения спекл-структуры являются произвольные значения фазы оптического поля в соседних точках плоскости изображения. Формирование каждой точки изображения можно трактовать как результат дифракции на периодической структуре с определенной пространственной частотой и углом поворота штрихов, расположенных в плоскости оптического элемента. Дифракция на такой структуре дает пятно, угловые размеры которого больше, чем расстояния между соседними пятнами, поэтому несколько соседних пятен будут перекрываться и интерферировать между собой. Результат такой интерференции и даст спекл-структуру.

В работе приведены результаты реализации ДОЭ, не имеющих в изображении спекл-структуры за счет пространственного разделения соседних пятен. При стандартном варианте итерационного расчета ДОЭ (например, алгоритмом Герчберга-Сэкстона) угловое расстояние между соседними точками изображения составляет величину λ/d , где λ – длина волны излучения, а d – диаметр ДОЭ. В то же время минимальный размер пятна, даваемого оптическим элементом диаметра d, составляет $2\lambda/d$. показывают, размер точек, расчеты что киноформом, составляет не менее $4\lambda/d$. Идея подхода состоит в том, чтобы рассчитывать изображение с шагом не менее $4\lambda/d$, тогда соседние пятна не будут перекрываться, и мы получим изображение, состоящее из раздельных, но регулярно расположенных на сетке с шагом $4\lambda/d$ пятен, которое визуально воспринимается как более качественное, нежели спеклструктура.

ДОЭ рассчитывался на массиве 16384x16384 точек, а полное поле изображения состояло из 4096x4096 точек. Само изображение состояло из 115x115 точек с угловым размером 4 градуса. Рассчитанный ДОЭ был реализован в виде бинарной структуры и изготовлен на резисте с помощью электронно-лучевого литографа с размером структуры 200 нм и освещался одномодовым He-Ne лазером с $\lambda = 633$ нм.

Т.Ю. НИКОЛАЕВА, Н.В. ПЕТРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ГОЛОГРАММ В ЗАДАЧЕ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ЧАСТИЦ

В данной работе рассмотрены подходы к решению задачи характеризации частиц. В результате сравнительного анализа установлены особенности и недостатки различных методов. В частности, показано, что метод на основе оконтуривания и пороговой обработки изображений обладает определенными преимуществами, так как позволяет решать задачу статистического учета частиц при высоких концентрациях и уровнях шума.

T.Yu. NIKOLAEVA, N.V. PETROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

PROCESSING OF IMAGES AND HOLOGRAMS IN THE PROBLEM OF CHARACTERIZATION OF PARTICLES

In this paper, different approaches to the problem of particle characterization are investigated. The specific features and limitations of different methods were specified as a result of the comparative analysis. In particular, it is shown that image processing method based on edge-point linking and thresholding has certain advantages, as it allows to solve the problem of statistical accounting of particles at high concentrations and noise levels.

Задача характеризации частиц представляет большой интерес как во многих областях научных исследований, таких как, исследование частиц различной природы в задачах биологии и медицины [1], изучение динамики потоков частиц [2], так и в практических приложениях, где прежде всего имеет значение знание таких статистических характеристик частиц, как концентрация и характер их распределения по объему. Существует множество методов обработки изображений частиц, полученных в когерентном свете, среди которых можно выделить цифровую/спекл-фотографию (DSP,ESP), методы лазерной спеклометрии и анемометрии по изображениям частиц (LSV, PIV), цифровую голографию (DH) и алгоритм обработки изображений на основе

оконтуривания и пороговой обработки (edge-point linking and thresholding - ELT). Результаты сравнительного анализа отражены в таблице 1. В данной работе проанализированы особенности различных методов, которые позволяют получить двумерные (2D) и трехмерные (3D) распределения координат и полей скоростей частиц, при их размере от 10 до 100 мкм и в следующих диапазонах концентраций частиц: малые (менее 25 частиц/мм³), средние (25-70 частиц/мм³), высокие (более 70 частиц/мм³). В результате установлено, что алгоритм ELT обладает преимуществами перед другими рассмотренными более методами, частности, позволяет исследовать концентрации частиц по сравнению с DH методами. При этом коэффициент эффективности распознавания частиц остается достаточно высоким для отношения сигнал-шум до 15 дБ.

Таблица 1. Сравнение методов характеризации частиц

Метод		Концентрации	Преимущества	Недостатки
		частиц		
ESP,DSP [1]		средние	простота	декорреляция
			оптической схемы	спеклов
LSV, PIV [2]		средние (PIV)	высокая скорость	2D; стоимость
		и высокие	обработки данных	
		(LSV)		
	Off-axis,	средние	3D; отсутствие	сложность
	DH		мнимого	оптической схемы
	PIV[3]		изображения	
DH	In-line [4]	малые	3D; простота	мнимое
			оптической схемы	изображение
[5,6]		высокие	высокая скорость	эффект
			обработки данных;	когерентного
			простота	наложения частиц
ELT			оптической схемы;	
П			стоимость	

- 1. Synnergren P., Larsson L., Lundström S. // Appl. Opt. 2002. V.41. №7. P.1368 –1373.
- 2. Воронецкий А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. // Оптический журнал. 2012. Т.79. №1. С.18–24.
 - 3. Murata S., Harada D., Tanaka Y. // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. V.48. №9S2. P.09LB01.
 - 4. Pitkäaho T., Niemelä M., Pitkäkangas V. // Appl. Opt. 2014. V.53. №15. P.3233–3240.
 - 5. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. // JPCS. 2014. V.536. №1. P.012026.
 - 6. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. // Proc. SPIE. 2014. V.9216. P.921612.

Н.Ю. ЗААЛИШВИЛИ, С.Г. КАЛЕНКОВ

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

О ЦИФРОВОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФАЗОВОГО ПРОФИЛЯ МИКРООБЪЕКТА В ЗАДАЧАХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПИИ

Предложен метод расчета и визуализации фазового профиля микрообъекта в задачах гиперспектральной голографической фурье-микроскопии.

N.Yu. ZAALISHVILI, S.G. KALENKOV

Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)

ABOUT ONE DIGITAL APPROACH OF MICOOBJECT PHASE PROFILING IN HYPERSPECTRAL FOURIER-MICROSCOPY

Phase unwrapping and carrier elimination are applied to form a plane phase surface profile of the microobject. Summation of phase profiles obtained at different wavelength is done to denoise the signal.

по цифровой пространственно-спектральной фурьеголографии авторы предложили метод восстановления комплексной амплитулы микрообъектов В полихроматическом излучении. Предложенный метод позволяет восстановить как амплитудное, так и фазовое изображение микрообъекта для любой спектральной компоненты зарегистрированным двумерным интерферограммам восстанавливают комплексную амплитуду волнового поля микрообъекта A(x, y), при этом возможно вычислить его изображение, как $|A(x, y)|^2$, и его фазу $\varphi(x, y) = \arctan[\text{Im}(A)/\text{Re}(A)]$. Функция *arctan* возвращает относительное значение фазы сигнала в диапазоне от - π до π , при этом абсолютное значение фазы - информация о числе полных периодов утрачивается. Представленная в таком виде фазовая информация называется свернутой ("wrapped phase"), а процедуру вычисления абсолютного значения фазы называют сшивкой фазы. В нашей работе мы использовали алгоритм [3]. На входе такой алгоритм получает свернутую функцию $\varphi(x,y)$, а на выходе возвращает гладкую функцию без разрывов. После устранения сферической несущей сигнала получаем

плоский фазовый фронт. Отметим, что можно существенно повысить качество изображения, усреднив информацию по всем спектральным компонентам (рис. 1).



Рис. 1. Изображение оптического профиля среза земляного червя, построенное для одной спектральной компоненты (а), а также интегральный профиль для 25 спектральных компонент (б) и для 50 спектральных компонент (в)

Интересную особенность визуализации представляет возможность объединения амлитудно-фазовой информации об объекте. На рис. 2 представлен результат наложения плоского цветного изображения $|A(x,y)|^2$ на его же фазовый профиль.



Рис. 2. Результат совмещения плоского цветного изображения и фазового профиля

- 1. Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. Пространственно-спектральная цифровая голография микрообъектов в низкокогерентном свете // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №12. С.1-6.
- 2. Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Spectrally-spatial fourier-holography // Optics Express. 2013. V.21. No.21. P.24985-24990.
- 3. Herráez M.A., Burton D.R., Lalor M.J., Gdeisat M.A. Fast two dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path # Applied Optics. 2002. V.41. Is.35. P.7437-7444.

Е.И. КОТОВА, А.Л. СМИРНОВА

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ГОЛОГРАММНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР

Рассмотрен принцип действия абсолютного лазерного баллистического гравиметра, выполненного на основе падающей голографической дифракционной решетки. Кратко описан эксперимент, демонстрирующий указанный принцип измерений, обсуждены конструктивные особенности оптической схемы гравиметра.

E.I. KOTOVA, A.L. SMIRNOVA

Saint Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

HOLOGRAPHIC BALLISTIC GRAVIMETER

The principle of operation of ballistic laser gravimeter based on a dropping holographic diffraction grating is described. An experiment that demonstrates this principle measurements briefly describe, discussed design features optical scheme of the gravimeter.

ВЧ-гравиметрия является важным направлением созлании гравиметрических приборов для исследования динамических процессов в ядре и коре Земли и аппаратуры предупреждения природных катастроф (землетрясений, оползней, цунами) [1]. В оптической схеме лазерного баллистического гравиметра (ЛБГ)нового типа использована пропускающая голографическая дифракционная решетка траектории падения пробного тела составляет доли мм [2], в отличие от известных приборов, в которых данная длина составляет десятки см. Сравнительно большое время падения пробного тела в таких ЛГБ существенно ограничивает их временную разрешающую способность.

При свободном падении голографической решетки величина ускорения g прямо связана с изменением частоты света, дифрагирующего на голограмме,

$$g = \frac{\lambda}{\sin \alpha + \sin \beta} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right). \tag{1}$$

где λ - длина волны света, α и β - углы падения и дифракции света на голограмме, частота f равна частоте биений при фоторегистрации картины

интерференции, получаемой при когерентном сложении дифрагирующей и опорной (нулевого порядка дифракции) волн, а скорость изменения во времени характеризует абсолютную величину частоты биений ускорения g. Описанный принцип действия голограммного баллистического гравиметра экспериментально продемонстрирован в [2], при этом использовалась голограмма с дифракционной эффективностью 37 %, с угловой селективностью дифракции 10 градусов, углы α =0°, β =37.8°, длина волны света λ =632,8 нм. В докладе приведен пример регистрируемого фотодетектором частотно-модулированного сигнала Практичный оптической биений. вариант схемы голограммного гравиметра, в котором для совмещения дифрагирующих пучков света используется специальная призма, показан на рис. 1.

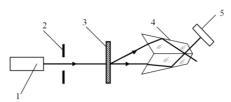


Рис. 1. Оптическая схема гравиметра с использованием призмы ПВО: 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – голограмма, 4 – призма ПВО, 5 – фотодиод

При стабилизации оптико-механической конструкции баллистического гравиметра, ее вакуумировании, и при использовании малогабаритных электронно-оптических оптических элементов (например, одночастотного полупроводникового лазера, призменных светоделителей) на основе описанного принципа может быть создан компактный ВЧгравиметр с временным разрешением порядка сотых долей сек. Такие гравиметры могут с успехом использоваться в геофизической аппаратуре поиска полезных ископаемых, предупреждения землетрясений и в других областях. Применение современных статистических методик фильтрации обработки регистрируемых ЛЧМ-сигналов биений обеспечит увеличение мобильности и точности проводимых измерений.

- 1. Dmitriev A.L., Nikushchenko E.M. Prospects and Methods of HF-Gravimetry $/\!/$ IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry. Saint-Peterburg, 2013. P.73-74.
- 2. Дмитриев А.Л., Котова Е.И., Никущенко Е.М., Смирнова А.Л., Прокопенко В.Т. Баллистический гравиметр с падающей голографической дифракционной решеткой // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.117. №5. С.110-111.

К А ГРЕБЕНЮК

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО МАТРИЧНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА

Проведен сравнительный анализ различных математических моделей цифрового матричного фотодетектора, встречающихся в современных научных статьях по цифровой голографии. Обнаружено, что только одна из рассмотренных моделей приводит к корректным результатам. Предложен математический вывод уравнения этой модели.

K.A. GREBENYUK

Saratov state university named after N.G. Chernyshevskiy

MATHEMATICAL MODEL OF DIGITAL ARRAY PHOTO SENSOR

An analytical review of different mathematical models of digital array photo sensor used in contemporary scientific papers on digital holography has been made. It has been found that only one of the reviewed models yields to correct results. The analytical derivation for this model has been proposed.

В цифровой голографии для регистрации картины интерференции объектной и опорной волн вместо фоточувствительной пластинки используется цифровой матричный фотодетектор. При анализе влияния параметров фотодетектора на свойства получаемой цифровой голограммы используют формулы, выражающие отсчеты интенсивности света I_s , регистрируемые фотодетектором, через непрерывное распределение интенсивности I_B интерференционной картине в плоскости регистрации.

Однако используемые различными авторами математические модели фотодетектора имеют существенные различия. Например, в [1], [2], [3] отсчеты интенсивности, регистрируемые фотодетектором, описываются, соответственно, формулами:

$$I_{s}(x,y) = \left\{ \left[I(x,y) \otimes rect \left(\frac{x}{\Delta x_{p}}, \frac{y}{\Delta y_{p}} \right) \right] \sum_{n,m=-\infty}^{\infty} \delta(x - n\Delta x, y - m\Delta y) \right\} \times \mathbf{x} \ rect \left(\frac{x}{N\Delta x}, \frac{y}{M\Delta y} \right)$$
(1)

$$I_s(x,y) = I(x,y) \left[rect\left(\frac{x}{\alpha \Delta x}\right) rect\left(\frac{y}{\beta \Delta y}\right) \otimes comb\left(\frac{x}{\Delta x}\right) comb\left(\frac{y}{\Delta y}\right) \right] \times \times rect\left(\frac{x}{N\Delta x}\right) rect\left(\frac{y}{M\Delta y}\right)$$
 (2)

$$I_s(x) = \left(I(x) \sum_{n=-N}^{N} \delta(x - n\Delta x)\right) \otimes rect\left(\frac{x}{\Delta x_p}\right)$$
(3)

Все три формулы приведены здесь в единых обозначениях: Δx , Δy — периоды пиксельной структуры фотодетектора; Δx_p , Δy_p — размеры пикселя (только светочувствительной части); N, M — число пикселей вдоль осей x и

$$y; n, m$$
 – номера отсчетов интенсивности; $\alpha = \frac{\Delta x_p}{\Delta x}$, $\beta = \frac{\Delta y_p}{\Delta y}$.

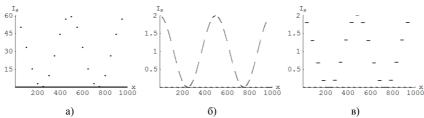


Рис. 1. Совокупность отсчетов I_s интенсивности, регистрируемых фотодетектором, рассчитанная при косинусоидальной форме распределения I(x): а) согласно модели (1); б) согласно модели (2); в) согласно модели (3)

Как видно из результатов тестового расчета (см. рис. 1), только модель (1) корректно представляет совокупность регистрируемых фотодетектором отсчетов I_s в виде дискретного сигнала (т.е. сигнала, заданного на счётном множестве точек). Модели (2) и (3) этому требованию не удовлетворяют, и выводы о свойствах цифровых голограмм, полученные с их помощью, в общем случае, будут неверными. Например, в [3, 4] при использовании модели (3) для анализа спектра сигнала, восстановленного с цифровой голограммы, сделаны выводы, противоречащие работе [1]. Выводы, полученные в [2] с помощью модели (2), подвергнуты критике в [5].

Наличие рассмотренных выше противоречий делает актуальным проведение сравнительного анализа существующих математических моделей фотодетектора и осуществление математического вывода корректной модели. Именно эти задачи решены в представляемой работе.

- 1. Jacquot M., Sandoz P. // Opt. Eng. 2004. V.43. No.1. P.214-223.
- 2. Kreis T. // Opt. Eng. 2002. V.41. No.4.P.771-778.
- 3. Корешев С.Н. и др. // Мир голографии. 2013. Т.1. №2. С.31-42.
- 4. Корешев С.Н. и др. // Оптический журнал. 2014. Т.81. №3. С.14-19.
- 5. Guo C.S., et. al. // Opt. Eng. 2003. V.42. No.9. P.2768-2771.

К.В. КОЗЛОВ, В.Н. СОЛЯКОВ, П.А. КУЗНЕЦОВ, А.В. ПОЛЕССКИЙ

ОАО «НПО «Орион», Москва

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОРЯДНОГО МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА С РЕЖИМОМ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ И НАКОПЛЕНИЯ

Представлена модель многорядного матричного фотоприемного устройства с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), предназначенного для регистрации точечных источников оптического излучения. Исследован ряд вопросов, связанных с влиянием электронного тракта прибора, его топологии на выходные характеристики.

V.N. SOLYAKOV, K.V. KOZLOV, P.A. KYZNETSOV, A.V. POLESSKY

Orion research and production association, Moscow

MATHEMATICAL MODEL OF TIME DELAY INTEGRATION FOCAL PLANE ARRAY

Mathematical model of TDI FPA if showed. A set of problems, connected with the parameters of TDI FPA circuit and topology has been researched.

Многорядные матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) широко используются достижения предельных значений по чувствительности пространственному разрешению. Одним из важных применений систем подобного класса является решение задач обнаружения источников оптического излучения. Процесс сканирования с ВЗН обеспечивает ряд важных преимуществ, таких как уменьшение влияния разброса чувствительности фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и количества дефектных элементов на вероятность обнаружения цели [1], возможность создания топологического перекрытия [2] либо организация микросканирования для улучшения пеленгационной характеристики, в ряде случаев повышенное по сравнению с МФПУ "смотрящего" типа значение удельной обнаружительной способности и т.д.

На данный момент проблема регистрации точечных источников оптического излучения с использованием ВЗН – МФПУ исследована

недостаточно полно. При разработке новых образцов изделий возникает ряд вопросов, решение которых требует комплексного подхода. Таким подходом может стать компьютерное моделирование ВЗН -МФПУ при различных параметрах входного оптического сигнала. Важным моментом является экспериментальная проверка результатов модели, а также их результатами отдельных теоретических Следующим шагом является определение области применения, т.е. необходимо строго задать диапазон изменения исходных параметров для предотвращения выхода за рамки тех предположений, на которых модель основана. Если эти два условия выполнены, то можно использовать модель для получения тех характеристик, которые пока не были измерены экспериментально. Именно по этому принципу выполнена работа. Вначале представленная приведено описание основных математических соотношений, являющихся основой модели, и приведен допустимый параметров. диапазон изменения входных осуществлена экспериментальная проверка некоторых ЭТОГО характеристик модели. После модель использовалась прогнозирования выходных характеристик будущих изделий. Одним из решенных вопросов является пересчет амплитуды выходного сигнала МФПУ при равномерной засветке матрицы ФЧЭ модулированным излучением абсолютно черного тела (АЧТ) в режиме без сканирования в соответствующий отклик от точечной цели в режиме сканирования. Данный вопрос является важным для корректного измерения основных параметров ВЗН – системы по модулированному излучению. Другими вопросами. освещенными работе. В являются важными пеленгационной характеристики ВЗН – МФПУ и его частотно – контрастная характеристика (ЧКХ). Данные параметры в первую очередь определяют пространственное разрешение системы обнаружения и зависят от многих факторов. В конце доклада представлены изображения на выходе ВЗН - МФПУ, полученные при наличии в фокальной изображений точечной цели пространственно И неоднородного фонового излучения.

^{1.} Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992.

^{2.} Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.

А.А. БОРИСКЕВИЧ, В.К. ЕРОХОВЕЦ, В.В. ТКАЧЕНКО

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ КВАНТОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ И ФРЕНЕЛЯ

Предложены модели цифрового синтеза и восстановления голограмм Фурье и Голографические технологии защиты документов на разработанных моделей обеспечивают высокий vровень защищенности информации от атак и помех за счет расширения множества секретных слабокоррелированных двухмерных ключей псевдослучайных виде амплитудных и фазовых кодирующих матриц, высокий уровень устойчивости к повреждениям и защищенности за счет увеличения избыточности голограмм.

A.A. BORISKEVICH, V.K. EROHOVETS, V.V. TKACHENKO

United institute of informatics problems of NAS of Belarus, Minsk

MODELS OF FOURIER AND FRESNEL DIGITAL QUANTIZED HOLOGRAMS

The goal of the work is the development of digital models of Fourier and Fresnel quantum protection holograms with visual effects. The holographic technologies of document protection (on electronic and hard media) based on designed models provide a high level of information protection from attacks and bugs by means of expansion of a variety of secret bi-dimensional codes in form of low correlated pseudorandom amplitude and phase encoding matrix, and by means of a high level of protection and resistance against damages with respect to an increase of hologram redundancy.

Использование цифровых многоградационных голограмм является одним из перспективных направлений совершенствования защиты документов и медиаданных в современных инфокоммуникационных технологиях [1]. Полутоновые изображения, используемые в качестве эффективного носителя визуальной информации, обладают информационной избыточностью (кодовая. корреляционная психовизуальная), которая может служить значительным резервом повышения помехоустойчивости изображений за счет использования голографической формы представления цифрового изображения, а также использоваться с целью управления степенью защиты и снижения себестоимости защиты данных. Предложены модели квантованных голограмм Фурье, основанные на амплитудном и фазовом псевдослучайном кодировании опорного объектного пучков,

формировании интерференционной структуры с и без опорного пучка. Установлены зависимости качества голографического изображения от количества уровней квантования фазовой и амплитудной компонент и количества итераций при восстановлении голограммы. Результатами моделирования показаны условия достижения оптимальных соотношений между качеством восстановленных изображений и коэффициентом сжатия информации о голограмме, при которых сохраняется устойчивость к площадным повреждениям с качеством воспроизведения по уровню $PSNR \geq 30$ дБ и высокой степени защищенности за счет увеличения

множества двухмерных секретных ключей (более 2^{128}), представленных в виде псевдослучайных амплитудных и фазовых кодирующих матриц. Анализируются модели псевдоголографических изображений, синтезированных с использованием хаотических кодирующих последовательностей и матриц рассеивающих перестановок.

Разработана модель защищенных квантованных голограмм Френеля, основанная на интерференции Френель-образа исходного изображения и опорного пучка с псевдослучайным амплитудно-фазовым кодированием, формировании считывающего пучка и вычислении обратного дискретного преобразования Френеля. Ключевыми параметрами голограмм Френеля являются расстояние между исходным изображением и плоскостью голограммы, виртуальная длины волны и секретный ключ генератора фазовой маски опорного пучка. Предложена модель защищенных квантованных наложенных безопорных голограмм Френеля, основанная на цифровом синтезе голограмм для изображений, расположенных на различных расстояниях от плоскости регистрации голограмм, и выборе правила объединения отдельных безопорных голограмм Френеля и безопорной голограммы Френеля псевдослучайной фазовой маски (синтеза наложенных голограмм). Восстановление изображений последней осуществляется посредством вычисления ее Фурье-спектра, вычитания Фурье-спектра голограммы Френеля псевдослучайной фазовой маски, модификации Фурье-спектра с учетом диапазона расстояний для каждого из изображений, вычисления обратного дискретного Фурьепреобразования, формирования считывающего пучка голограммы Френеля и вычисления обратного дискретного преобразования Френеля. Предложенные модели могут быть использованы для синтеза голограмм с оптической и логической защитой информации.

Список литературы

1. Борискевич А.А., Ероховец В.К., Ткаченко В.В. Голографическая защита информации. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012.

Д.А. ИСМАИЛОВ, К.М. ЖУМАЛИЕВ, А.Д. АККОЗОВ, А.А. ЖЭЭНБЕКОВ 1

Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек ¹Кыргызско-Российский (Славянский) университет, Бишкек

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

В данной работе описывается голографическая память, основанная на записи синтезированных голограмм страницы цифровой информации с опорным пучком. Приведены оптическая схема, методика записи голограмм и указаны ее преимущества перед традиционной схемой.

D.A. ISMAILOV, K.M. ZHUMALIEV, A.D. AKKOZOV, A.A. JEENBEKOV¹

Institute of physical and technical problems and material science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

¹Kyrgyz-Russian (Slavic) university, Bishkek

HOLOGRAPHIC STORAGE OF DIGITAL INFORMATION BASED ON THE GENERATED HOLOGRAMS

This paper describes a holographic memory based on records generated holograms page digital information with a reference beam. Shows the optical scheme, the process of recording holograms and indicated its advantages over the conventional scheme.

Современное состояние оптоэлектронных приборов и компьютерной технологии способствуют дальнейшему развитию разработок голографической памяти [1, 2]. Известные методы основаны на записи интерференционной картины опорного и предметного пучка. При разработке таких систем экспериментаторы сталкиваются с трудностью, связанной с необходимостью точного совмещения опорного пучка с предметным при записи голограмм. Для отклонения опорного пучка на необходимый угол используются дорогостоящие дефлекторы, которые усложняет процесс записи информации.

Для устранения указанного недостатка нами предложен следующий способ записи цифровой информации (рис. 1). На жидкокристаллическом модуляторе света отображается распределение интенсивности световой

волны, рассчитанной по методике синтеза цифровой голограммы страницы цифровой информации с использованием опорной волны. Расчет распределения интенсивности осуществляется по одной из следующих трех формул:

$$I(\xi,\eta) = R_0^2 + A^2(\xi,\eta) + 2R_0 A(\xi,\eta) \cos[\varphi_0(\xi,\eta) - \varphi(\xi,\eta)]$$
(1)

$$I'(\xi,\eta) = I_0 + 2R_0 A(\xi,\eta) \cos[\varphi_0(\xi,\eta) - \varphi(\xi,\eta)],$$
 (2)

$$I''(\xi,\eta) = 2R_0 A(\xi,\eta) \{1 + \cos[\varphi_0(\xi,\eta) - \varphi(\xi,\eta)]\}$$
(3)

где $R_0 = const$ и $\varphi_0(\xi,\eta)$ - модуль и фаза опорной световой волны; $A(\xi,\eta)$, $\varphi(\xi,\eta)$ — соответственно модуль и фаза фурье-образа голографируемого объекта, т.е. страницы цифровой информации; смещение — $I_0 > 2R_0 \max\{A(\xi,\eta)\}$.

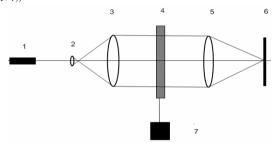


Рис. 1. Схема записи цифровой информации в виде синтезированных голограмм: 1 - лазер, 2 - микрообъектив, 3,5 - линзы, 4 - жидкокристаллический модулятор света, 6 - фотоматериал, 7 - компьютер

Расчет синтезированной голограммы осуществляется с помощью компьютера 7. Линза 5 уменьшает изображение распределения интенсивности, рассчитанной по формулам (1-3), до требуемых размеров на плоскости фотоматериала 6. Таким образом, изменяя положение фотоматериала 6, можно записать множество фурье-голограмм без реального использования опорного пучка. Для записи таких голограмм не потребуются когерентные источники света, и значительно упрощается процесс записи голограмм.

- 1. Jeenbekov A.A., Zhumaliev K.M., Ismailov D.A. Research methods of recording overlapped holograms in archival holographic memory // Optics&Photonics Japan. 2014. 6aDS1.
- 2. Saita Yu., Nomura T. Multilevel recording characteristics on holographic memory applied phase gradient coding // Optics & Photonics Japan. 2014. 6pE10.

А.Ю. БЕТИН¹, В.И. БОБРИНЁВ¹, С.С. ДОНЧЕНКО¹, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, С.Б. ОДИНОКОВ¹, Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ПОСТРОЧНАЯ СИСТЕМА СЧИТЫВАНИЯ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ ОДНОМЕРНЫХ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Высокая плотность хранения информация достигается мультиплексной записью одномерных голограмм. Раздельное считывание мультиплексированных структур достигается использованием анаморфотного объектива. Рассмотрен построчный метод считывания мультиплексированных одномерных голограмм Фурье.

A.Yu. BETIN¹, V.I. BOBRINEV¹, S.S. DONCHENKO¹, E.Yu. ZLOKAZOV, S.B. ODINOKOV¹, R.S. STARIKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

¹Bauman Moscow state technical university

LINE-BY-LINE INFORMATION READOUT SYSTEM FROM MULTIPLEXED 1D FOURIER-HOLOGRAMS FOR HOLOGRAPHIC MEMORY

High density of storage information is reached by multiplex record of onedimensional holograms. Separate reading of the multiplexed structures can be reached using an anamorphic lens. The line-by-line method of reading of the multiplexed onedimensional holograms of Fourier is considered.

Современные информационные технологии работают с возрастающим объемом данных. Для решения проблемы долгосрочного и компактного хранения этой информации целесообразно использовать голографические методы для хранения информации. Их применение позволит в перспективе существенно увеличить плотность записи и срок хранения информации.

В наших предыдущих работах было предложено использовать метод компьютерного синтеза голограмм вместо традиционного «двухлучевого» подхода, когда информационная голограмма является результатом интерференции световых полей [1].

Компьютерно-синтезированная голограмма представляет из себя полутоновое изображение, которое выводится на жидко-кристаллический пространственно-временной модулятор света (ЖК ПВМС) вводится в проекционную оптическую систему, которая уменьшает голограмму до необходимых размеров и записывает на фоточувствительный носитель. Высокая плотность хранения информации достигается мультиплексированием 1D голограмм Фурье, рассчитанные структуры выводятся на ЖК ПВМС и записываются с угловым поворотом относительно друг друга.

Для раздельного считывания одномерных мультиплексированных голограмм предлагается схема построчного считывания (рис. 1), которая не зависит от сложности объекта, проста в реализации и не предъявляет высокие требования к приемнику оптического излучения. Система считывания состоит из: лазера (1), микрообъектива (2,3) пинхола (4,5), дефлектора (6), цилиндрической линзы (7), сферического объектива (8), носителя информации (9), анаморфотного фурье-объектива (10,11) и ПЗС-камеры (12).

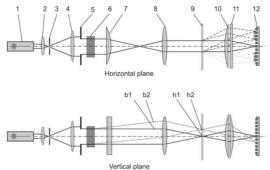


Рис. 1. Построчная схема считывания мультиплексированных одномерных голограмм Фурье

Сферический объектив, диафрагма, дефлектор и цилиндрическая линза формируют узкий считывающий луч, равный по ширине голограмме информационной строки. Он попадает на нужную информационную строку, дифрагирует, затем попадает на фурье-объектив, и восстановленную информацию фиксирует ПЗС-камера.

Список литературы

1. Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Donchenko S.S., Odinokov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory system based on projection recording of computer-generated 1D-Fourier holograms // Applied Optics. 2014. V.53. Is.28. P.6591-6597.

$C.\Gamma.$ КАЛЕНКОВ 1 , $\Gamma.C.$ КАЛЕНКОВ 2 , A.Е. ШТАНЬКО

Московский государственный технологический университет «Станкин» ¹Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) ²ООО «Микрохоло», Москва

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ МИКРООБЪЕКТОВ В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Рассматривается новое применение Фурье-спектрометра – возможность записи гиперспектральных голограмм микрообъектов в некогерентном свете.

S.G. KALENKOV¹, G.S. KALENKOV², A.E. SHTANKO

Moscow state university of technology (Stankin)

¹Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)

²Microholo Ltd., Moscow

HYPERSPECTRAL HOLOGRAPHY OF MICROOBJECTS IN UNCOHERENT LIGHT

New application of the fourier-spectrometer is considered, It is shown that it can be used to record hyperspectral holograms of microobjects in uncoherent light.

Как хорошо известно [1], спектральный состав излучения, несущий информацию об оптических свойствах образца определяется численным Фурье-преобразованием несимметричной интерферограммы, полученной на выходе интерферометра в процессе изменения длины одного из его плеч. Несимметричная интерферограмма получается тогда, когда образец установлен в одном из плеч интерферометра (на месте неподвижного зеркала). В этом случае преобразование Фурье интерферограммы дает комплексную амплитуду спектра излучения, отраженного от образца, которая содержит полную информацию о спектральных свойствах образца, именно: зависимость комплексного показателя преломления образца от спектральной частоты $\sigma = 1/\lambda$, λ – длина волны. Формально оптическая схема регистрации несимметричной интерферограммы совпадет со схемой записи голограммы. Действительно, в обоих случаях имеются интерферирующие объектный и опорный световые пучки. Но в Фурье-спектрометре интерферограмма регистрируется детектором, а в предложенной нами голографической схеме цифровая голограмма (или интерферограмма) регистрируется как двумерное поле интенсивности в некоторой плоскости с помощью цифровой камеры.

Интерференция объектного светового пучка с опорным пучком позволяет в ходе движения опорного зеркала записать в каждом пикселе матрицы интерферограмму. Мы показали, что Фурье-преобразование от таких интерферограмм определяет комплексную амплитуду дифрагированного поля объекта для каждой спектральной частоты входящей в состав излучения, то есть гиперспектральную голограмму.

Таким образом, Фурье спектрометр является не только спектральным прибором, т.е. прибором, способным с очень высоким разрешением определять спектры пропускания или поглощения образцов, но он, как оказывается, способен на гораздо большее: он может еще и записывать цифровые гиперспектральные голограммы микрообъектов в полихроматическом излучении. Принципиальную возможность такой записи мы показали в [2, 3]. В [4, 5] была развита теория предлагаемого метода, и экспериментально получены гиперспектральные голограммы образцов некоторых микрообъектов. В настоящей работе мы приводим результаты новых теоретических и экспериментальных исследований по гиперспектральной Фурье-голографии микрообъектов.

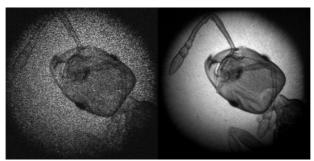


Рис. 1. Изображение, восстановленное для одной спектральной компоненты (слева) и для суммы 145 спектральных компонент (справа). Поле зрения 1 мм

Предложенный нами метод позволяет фокусироваться на разные плоскости трехмерного объекта. Такая возможность проиллюстрирована нами в эксперименте по записи двухслойного объекта, представляющего собой две наложенные одна на другую стандартные окулярные шкалы, освещаемые через матовое стекло. Продольное расстояние между шкалами составляло 2 мм. Гиперспектральные изображения обеих шкал, вычисленные при двух разных параметрах фокусировки z, приведены на рис. 2. Можно видеть отсутствие взаимного наложения изображений.

Гиперспектральная голографическая Фурье-микроскопия позволяет вычислить фазу волнового поля объекта $\varphi(\sigma,x) = arctg[\operatorname{Im} a(\sigma,x) / \operatorname{Re} a(\sigma,x)]$ для любой спектральной частоты. Эта функция содержит информацию об оптической толщине (оптическом профиле) объекта и во многих случаях более информативна, чем обычное амплитудное изображение. Усредняя оптические профили всех спектральных компонент, получим интегральный оптический профиль, в котором шумы, характерные для отдельных компонент, будут сглаженными. Пример построенного таким образом интегрального профиля среза земляного червя показан на рис. 3.

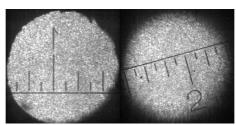


Рис .2. Цифровая фокусировка на разные плоскости двух окулярных шкал. Поле зрения 1 мм



Рис. 3. Изображение оптического профиля среза земляного червя, построенное для одной спектральной компоненты (слева), а также интегральный профиль для 25 спектральных компонент (в центре) и 50 спектральных компонент (справа)

- 1. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.
- 2. Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. Фурье-спектрометр как система голографического изображения микрообъектов в низкокогерентном свете // Измерительная техника. 2012. Т.11. С.21-25.
- 3. Каленков С.Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. Пространственно-спектральная цифровая голография микрообъектов в низкокогерентном свете // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №12. С.1-6.
- 4. Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Spectrally-spatial fourier-holography // Optics Express. 2013. V.21. No.21. P.24985-24990.
- 5. Kalenkov G.S., Kalenkov S.G., Shtanko A.E. Hyperspectral holographic fourier-microscopy // Imaging and Applied Optics. OSA Technical Digest (online). 2014. P.DTh3B.7.

А.П. БОНДАРЕВА, Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, С.Н. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫМ ВВОДОМ ИНФОРМАЦИИ И ИЗМЕНЯЕМЫМ КОДИРУЮЩИМ КЛЮЧОМ НА БАЗЕ ДВУХ ЖК ПВМС

Предлагается схема оптического кодирования изображений с цифровым вводом информации и изменяемым кодирующим ключом на базе двух ЖК ПВМС, работающая с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением. Представлены результаты экспериментов по оптическому кодированию и численному декодированию изображений.

A.P. BONDAREVA, N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, S.N. STARIKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

SCHEME OF OPTICAL IMAGE ENCRYPTION WITH DIGITAL INFORMATION INPUT AND DYNAMIC ENCRYPTION KEY BASED ON TWO LC SLMS

Scheme of optical image encryption with digital information input and dynamic encryption key based on two LC SLMs and operating with spatially-incoherent monochromatic illumination is proposed. Results of experiments on images optical encryption and numerical decryption are presented.

Применение жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС) для оптического кодирования изображений позволяет обеспечить динамическую смену кодирующего элемента и цифровой ввод кодируемых изображений. ПВМС при этом используются как для ввода цифровой информации, так и для отображения кодирующего дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего кодирующий импульсный отклик [1].

Схема оптического кодирования изображений с цифровым вводом информации и изменяемым кодирующим ключом на базе двух ЖК ПВМС приведена на рис. 1. В качестве кодирующих ДОЭ использовались киноформы.

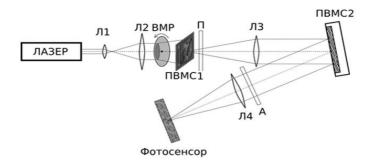


Рис. 1. Схема оптического кодирования изображений на базе двух ЖК ПВМС

Монохроматическое излучение лазера коллимируется линзами Л1, Л2. Вращающийся матовый рассеиватель ВМР разрушает пространственную когерентность. В качестве ПВМС1 для ввода кодируемых изображений использован амплитудный ПВМС «HoloEye LC2002», имеющий 800×600 пикселей размером 32×32 мкм². ПВМС1 размещен в передней фокальной плоскости линзы Л3. В ее задней фокальной плоскости расположен ПВМС2, используемый для динамического отображения кодирующего элемента. В качестве ПВМС2 использован фазовый ПВМС «HoloEye PLUTO VIS», имеющий 1920×1080 пикселей размером 8×8 мкм². Линза Л4 формирует изображение кодируемой сцены на фотосенсоре камеры. Камерой фиксируется кодированное изображение, представляющее собой свёртку кодируемого изображения с импульсным откликом киноформа.

Декодирование осуществлялось численно с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [2]. Оценка качества декодированных изображений производилась путём расчёта нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) [3] декодированных изображений от кодируемых.

Результаты проведённых предварительных экспериментов демонстрируют успешное кодирование и декодирование набора тестовых изображений на реализованной установке.

- 1. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Optical encryption with spatially-incoherent illumination using two LC SLMs for information input and encryption key dynamic generation // Proceedings of SPIE. 2014. V.9249. P.924915.
 - 2. Арсенин В.Я., Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
- 3. Fienup J.R, Invariant error metrics for image reconstruction // Appl. Opt. 1997. V.36. No.32. P.8352-8357.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.А. КУРБАТОВА, С.Н. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СЖАТИЕ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ 3D-НАБЛЮДЕНИЯ И МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Для увеличения скорости передачи информации о 3D-сценах и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для её хранения, необходим метод оперативного сжатия цифровых голограмм, дающий хорошее качество восстановления сцен. В работе предлагается разработка нового метода сжатия голограмм, имеющего быстродействие, сопоставимое со скалярными методами, а качество восстановленных изображений, сопоставимое с векторными.

N.N. EVTIKHIEV, E.A. KURBATOVA, S.N. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

COMPRESSION OF DIGITAL HOLOGRAMS FOR 3D-SURVEILLANCE SYSTEMS AND MEDICAL-BIOLOGICAL APPLICATIONS

Speed up of transmission of information about 3D-scenes and reducing of archival memory size required to store it, is important for surveillance systems and biomedical applications. For this a method of fast compression of digital holograms that giving good quality of scenes reconstruction is necessary. In this paper development of a new method of compression holograms having rapidity comparable with scalar methods and the reconstructed image quality comparable to the vector methods is proposed.

Цифровая голография, отличие фотографии, В OT позволяет регистрировать информацию не только о 2D, но и 3D-сценах [1]. Поэтому распространенным инструментом применений интерферометрии [2], микроскопии [3-4], обработке информации [1], реконструкции сцен [5-6] и др. Развитие характеристик матричных регистраторов привело к тому, что размеры файлов голограмм составляют десятки мегабайт. Для передачи голографического видео с частотой фильмов (24 Гц) необходимо иметь канал с пропускной способностью 2-4 Гбит/с, что существенно больше используемой в стандартных каналах связи в настоящее время. Аналогично для хранения такого видео необходимы большие объёмы носителей информации, так как 10 мин видео будет иметь размер более 1 терабайта.

Для увеличения скорости передачи голограмм и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для их хранения, можно проводить сжатие голограмм. Данная задача актуальна для: 1) систем 3D-наблюдения (охранные системы [5]; регистрация фауны океанов; восстановление объёмных сцен удаленно, в том числе регистрируемых в агрессивных средах); 2) медицинских применений (томография, наблюдение за состоянием органов человека) [4]; 3) интерферометрии [2]; 4) микроскопии (отслеживание микрообъектов, эритроцитов; анализ клеток [3]); 5) метрологии.

настоящее время предлагаются следующие методы сжатия голограмм: основанные на стандартах изображений и видео (JPEG, MPEG-4 и др.), скалярные (неравномерное логарифмическое сжатие и др.) и векторные (основанные на обучении системы, например, метод динамических ядер). Первая группа основана на статистических параметрах изображений и особенностях визуального человеком. Однако в случае голограмм эти методы значительно менее пригодны, так как снимки направлены на регистрацию амплитуды волны, а голограммы направлены в большей степени на сохранение фазы; наиболее важно качество именно восстановления, а не визуальное восприятие голограммы. Использование сжатия без потерь (например, LZW) уменьшает файл голограммы лишь до 2 раз [7]. Скалярные методы высокое быстродействие, наиболее низкое качество НО восстановления, а векторные - наиболее низкое быстродействие и высокое качество восстановленных изображений.

В данной работе предлагается разработка нового метода сжатия голограмм, имеющего быстродействие, сопоставимое со скалярными методами, а качество восстановления, сопоставимое с векторными.

- 1. Picart P., Li J.-C. Digital Holography. Wiley, Hoboken-London, 2012.
- 2. Monroy-Ramirez F., et. al. Monitoring micro-mechanical changes in electronic circuit boards with digital holographic interferometry // Optik. 2014. V.125. P.2113-2116.
- 3. Molder A., et. al. Non-invasive, label-free cell counting and quantitative analysis of adherent cells using digital holography // Journal of Microscopy, 2008. V.232. №2. P.240–247.
- 4. Bianco V., et. al. Clear microfluidics imaging through flowing blood by digital holography // IEEE Journal of. Selected Topics Quantum Electron. 2014. V.20, Is.3. P.6636048.
- 5. Locatelli M., Pugliese E., Paturzo M., et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography // Optics Express. 2013. V.21. Is.5. P.5379-5390.
- 6. Bruylants T., Blinder D., Ottevaere H., Munteanu A., Schelkens P. Microscopic off-axis holographic image compression with JPEG 2000 // Proc. SPIE. 2014. V.9138. P.91380F.

A.B. БЕЛАШО $B^{1,2}$, H.B. ПЕТРО B^1 , И.В. СЕМЕНО BA^2

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики ²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В работе на примере исследования эволюции солитонов деформации в неоднородных твердотельных волноводах рассматривается возможность применения методов восстановления цифровых голограмм для обработки голографических интерферограмм, записанных традиционным методом. Показано, что использование таких алгоритмов позволяет получить искомый массив значений фазового набега.

A. V. BELASHOV^{1,2}, N.V. PETROV¹, I.V. SEMENOVA²

¹Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics ²Ioffe physical-technical institute, Saint-Petersburg

DIGITAL HOLOGRAPHY ALGORITHMS APPLICATION FOR PROCESSING OF HOLOGRAPHIC INTERFEROGRAM OF FAST WAVE PROCESSES

The paper presents application of digital holograms reconstruction algorithms for processing of holographic interferograms recorded in traditional way during investigation of strain solitary wave evolution in inhomogeneous solid waveguides. It is shown that the use of such algorithms allows to obtain the desired phase shift values array.

В настоящее время существует большое количество различных методов измерения деформации в твердых телах. Однако при необходимости получения пространственного распределения деформации в большой области с хорошим временным разрешением, на наш взгляд, голографические методы обладают некоторыми преимуществами перед своими аналогами. Именно по этой причине для исследования быстропротекающих волновых процессов в твердотельных волноводах было решено использовать метод голографической интерферометрии.

Исследования нелинейных уединенных волн (солитонов) деформации показали что подобные волны распространяются в однородных волноводах практически без потерь, сохраняя свою форму [1]. Настоящая работа посвящена исследованию эволюции солитона деформации в двухслойных волноводах, выполненных из различных материалов

Регистрация волновых картин в исследуемых волноводах производилось с помощью метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии.

Обработка полученных данных вручную также является трудоемким процессом. В связи с этим было предложено обрабатывать полученные интерферограммы, используя методы восстановления пифровых голограмм. Ввиду лостаточно большого количества разрывов интерференционных полос, было решено алгоритм использовать обработки цифровых голограмм [2], производящий их регулируемое сглаживание. В работе показано, что применение таких алгоритмов к обработке интерферограмм действительно позволяет получить массив значений распределения фазы при отсутствии серьезных дефектов.

Так было установлено, что для однородных волноводов, выполненных из плексигласа, солитон имеют характерную длину порядка \sim 34 мм и амплитуду около \sim 1.8·10⁻⁴.

В результате исследования было показано, что при распространении волн в слоистых волноводах, склеенных стеклоподобным клеем «СуперМомент», солитоны в двух слоях распространяются как единая волна. В то же время в деламинированном волноводе волна распространяется в каждом из слоев независимо, со скоростью, характерной для данного материала.

А.В. Белашов благодарит за государственную финансовую поддержку ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Н.В. Петров благодарит за поддержку министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания. И.В. Семенова благодарит Российский научный фонд, грант № 14-12-00342.

- 1. Semenova I.V., Dreiden G.V., Samsonov A.M. Strain solitary waves in lengthy waveguides // Proc. SPIE. 2004. V.5532. P.308–315.
- 2. Liebling M., Blu T., Unser M. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram // JOSA A. 2004. V.21. No.3. P.367-377.

Л.С. ЛЯЛЮШКИН, А.В. ПАВЛОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ 4F СХЕМЫ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Исследована связь характеристик динамических режимов 4f схемы голографии Фурье резонансной архитектуры с оперативной перезаписью голограммы с параметрами нелинейных экспозиционных характеристик голографических регистрирующих сред.

L.S. LYALYUSHKIN, A.V. PAVLOV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

4F FOURIER HOLOGRAPHY SCHEME DYNAMICAL PROPERTIES IN DEPENDENCE OF HOLOGRAPHIC RECORDING MEDIA CHARACTERISTICS

4f Fourier holography setup with phase conjugating in the correlation plane dynamical properties in dependence of holographic recording media properties are investigated numerically.

Сегодня активно развивается когнитивный подход к обработке информации [1], основанный на выдвижении гипотезы – правдоподобного суждения, подлежащего затем проверке на адекватность. В этих рамках актуальна 4f схема голографии Фурье в линейном резонаторе, позволяющая реализовать ряд моделей гипотез [2]. В [3] предложена реализация на схеме индуктивных гипотез использованием нелинейного обращения волнового фронта в плоскости корреляций (НИО). В статье показано, что дифракция на перезаписываемой голограмме обеспечивает восстановление внутренней коррелированности паттерна гипотезы, разрушаемой НИО. В данной работе, в развитие [3, 4], исследовано влияние экспозиционных свойств голографических регистрирующих сред (ГРС) на динамику схемы при порождении индуктивной гипотезы.

Использованы экспозиционные характеристики [5, 6]: сигмоидальная

$$\eta H = 1 - \exp[k_h \ 1 - r_h H] \ 1 + \exp[k_h \ 1 - r_h H]^{-1}$$
 (1)

и с инверсным участком в области переэкспозиции

$$\eta H = \exp - H - a^{2} 0.5b^{-2}$$
 (2).

Ранее показано [3,4], что в устойчивом режиме в плоскости корреляции формируется паттерн с ярко выраженным глобальным максимумом (ГМ), d_C и d_{CNI} – его диаметры до и после НИО. В качестве оценки НИО и устойчивого режима приняты, соответственно:

$$\Delta_r = Nl^{-1} \ 0.5 - 0.5$$
 (3) $\qquad \qquad M \qquad \Delta_{Norm} = 2 \ d_C - d_{CNI} \ d_C + d_{CNI} \ ^{-1},$ (4)

где $N\Gamma^{I}$ — функция, обратная НИО. Для НИО использована также модель (1), в этом случае нелинейность оценивалась коэффициентом k. На рис. 1 даны зависимости оценок динамики (5) от оценок НИО (3) при разных характеристиках ГРС. На рис. 2 даны зависимости оценки (4) от оценки НИО k для ряда значений k_h (1)и их дисперсии на ансамбле реализаций.

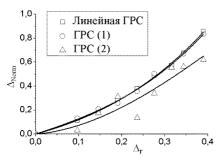


Рис. 1. Зависимости оценки динамики от оценки НИО для ряда моделей ГРС

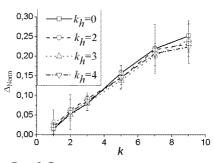


Рис. 2. Зависимости оценки динамики от оценки НИО для ряда оценок нелинейности ГРС

Из рис. 1 видно, что наличие инверсного участка характеристики ГРС снижает оценку (4); для некоторых реализаций итерационный процесс в спектральной плоскости не доходил до нулевой частоты. Большая дисперсия для ГРС (2) отражает большую зависимость устойчивого режима от конкретной реализации. Рис. 2 показывает слабую зависимость оценки (4) от нелинейности ГРС, различия меньше дисперсии оценок в силу неоднородности реализаций как следствия их ограниченности.

Работа поддержана РФФИ, проект 12-01-00418-а.

- 1. Кузнецов О.П. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. №4. С.32-42.
- 2. Бекяшева З.С., Васильев В.Н., Павлов А.В. // Оптический журнал. 2013. 80. №3. С.37-46.
- 3. Павлов А.В. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. №1. С.3-14.
- 4. Васильев В.Н. и др. // Оптический журнал. 2013. 80. №10. С.44-52.

К.М. ЖУМАЛИЕВ, Д.А. ИСМАИЛОВ, А.А. ЖЭЭНБЕКОВ¹, П.Д. ДЕМЬЯНОВИЧ¹, Ж. АБАКИРОВА², А.А. САРЫБАЕВА²

Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

¹Кыргызско-Российский (Славянский) университет, Бишкек ²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек

УЛУЧШЕНИЕ ЗАПИСИ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В ДОТ-МАТРИКС ГОЛОГРАММАХ

Описывается результаты исследования по формированию и записи матричных голограмм по технологии Dot-matrix (Дот-матрикс голограмм) на светочувствительном материале фоторезист, обсуждается принцип создание и изменение характеристик дифракционных решеток в мастер-матрице.

K.M. ZHUMALIEV, D.A. ISMAILOV, A.A. JEENBEKOV¹, P.D. DEMIANOVICH¹, D. ABAKIROVA², A.A. SARYBAEVA²

Institute of physical and technical problems and material science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

¹Kyrgyz-Russian (Slavic) university, Bishkek

²Kyrgyz state technical university named after I. Razzakov, Bishkek

IMPROVE OF RECORDING OF DIFFRACTION GRATINGS IN DOT-MATRIX HOLOGRAM

Describes the results of studies on the formation and matrix hologram recording technology Dot-matrix (Dot-matrix holograms) on the photosensitive material of the photoresist, discusses the principle of creating and modifying the characteristics of the diffraction gratings in the master matrix.

Значительное внимание исследователей уделялось на практическое применение приложений оптической голографии в виде голографические элементы, и разновидность этих элементов открыли большие возможности использования их в виде защиты продукции от подделок и фальсификации, и от несанкционированного копирования документов, ценных бумаг. Одним из таких голографических элементов является технология изготовления Дот-матрикс голограмм [1, 2].

Главное преимущество Дот-матрикс голограмм состоит в том, что, наряду с сохранением всех защитных свойств традиционных оптических

технологий, они позволяют создавать яркие и контрастные изображения с высокой насыщенностью цветов. Этой особенностью объясняется их широкое использование для создания имиджа торговых марок, защиты от фальсификации брендовых продукции, в качестве ярких декоративных элементов для полиграфической продукции (корпоративных проспектов, буклетов, флаеров и т.п.).

На рис. 1 показана экспериментальная установка для формирования Дот-матрикс голограмм. Излучения от гелий-кадмиевого лазера (He-Cd, 445,0 nm, DPSS, N~ 70 мВт) проходит через электромеханический затвор (9M3)который управлением под компьютера отрабатывает соответствующие времена экспонирования и оптических элементов (микрообъективы, зеркал, линз) фокусирует луч поверхность фоторезист приблизительно размером 30 мкм.



Рис. 1. Общий вид Дот-матрикс устройства

В компьютере эскиз изображения записываемого объекта преобразуется в растровое цветное изображение, далее преобразует в индексированный режим полутонового изображения (с помощью Corel Draw). Формирование дифракционных решеток пиксела достигается освещающую эту область в течение 0,3 с. Следующий дифракционных пиксель был произведен, когда образец был перемешен на 2,5 мкм.

Формирование пикселя один за другим продолжается, пока каждая дифракционная решетка пикселя с определенной ориентации полностью покроет весь массив Дот-матрикс голограммы. Из расчета вытекает, что время изготовления Дот-матриц голограммы зависит от плотности и сложностью эскиза изображений, например для точек 1200x1200, время выгравирования рельефа на фоторезисте составлял около 3-х часов.

- 1. Andrulevičius M., Tamulevičius T., Tamulevičius S. Formation and analysis of Dot-matrix holograms // Materials science (Medžiagotyra). 2007. V.13. No.4.
- 2. Бондарев Л.А., Куракин С.В., Одиноков С.Б., Цыганов И.К. Устройство для изготовления радужных голограмм. Патент RU(11) 2207611(13) C2 G03H1/08, G03H1/10, G03H1/26, 20.01.2001.

П.В. КУДРЯВЦЕВ, Б.Г. МАНУХИН, О.В. АНДРЕЕВА

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ НА ПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ

Представлены результаты исследования температурных эффектов при записи объемных полимерных голограмм, основанного на использовании метода цифровой голографической интерферометрии.

P.V. KUDRIAVTSEV, B.G. MANUKHIN, O.V. ANDREEVA

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

RESEARCH OF THERMAL EFFECTS DURING POLYMERIC HOLOGRAMS RECORDING ARE PRESENTED

The results of research of thermal effects during volume polymeric holograms recording are presented. The research is based on using method of digital holographic interferometry.

Регистрирующие среды на полимерной основе в настоящее время широко применяются для записи информации. Объект исследования в данной работе — полимерные пропускающие голограммы-решетки ($v\approx350\text{мm}^{-1}$), полученные на образцах полимерного материала «Диффен» [1], предназначенного для хранения информации. Объемные голограммы толщиной порядка миллиметра должны обеспечивать неизменность регистрируемой структуры в процессе записи и эксплуатации.

Оценки влияния температуры на параметры готовых голограмм показали, что голограмма при считывании информации на длине волны 488 нм имеет термический сдвиг угла дифракции 0.04 мрад/К [2]. Это свидетельствует о том, что в процессе записи голограммы за счет поглощения энергии также может происходить изменение оптических и физических параметров образца, что может влиять на качество зарегистрированной интерференционной картины.

В первую очередь нами был рассмотрен вариант равномерной засветки образца полимерной регистрирующей среды пучком излучения с длиной волны 488 нм (рис. 1а). Был использован стенд, разработанный для

исследования прозрачных объектов методом цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) [3]. Полученные результаты приведены на рис. 1б и 1в. Проведенные эксперименты показали, что температура в области воздействия излучения возрастает до максимального значения, которое зависит от мощности воздействующего излучения (рис. 1в). При этом происходит распространение тепла за пределы области воздействия, которое носит сложный характер.

Проведенная авторами модификация стенда ЦГИ позволила включить схему записи голограмм в состав интерферометрического стенда (рис. 1г). В результате проведенных экспериментов получены оценки изменения параметров образца при его нагреве записывающим излучением при различном уровне экспозиции. Предварительные результаты демонстрируют наличие тепловых эффектов, регистрируемых методом ЦГИ.

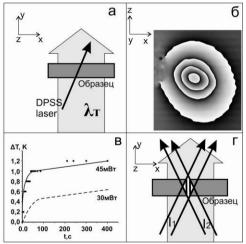


Рис.1. Освещение образца лазерным пучком (а), фазовый портрет процесса теплопереноса в исследуемом образце (б), изменение температуры в области воздействия пучка излучения разной мощности (в), освещение образца интерференционным полем при записи голограммы (г), $\lambda_{\scriptscriptstyle T}$ – тестирующее неактиничное излучение

- 1. Andreeva O.V., Bandyuk O.V. // Recording materials and Applications /ed. by I. Navdenova. 2011. ISBN 978-953-307-981-3. P.45-70.
- 2. Andreeva O.V., Korzinin Yu.L., Manukhin B.G. // Basic Principles and Contemporary /ed. by E. Mihaylova, 2013. ISBN: 978-953-51-1117-7. Ch.2. P.37-60.
 - 3. Alexenko I., Gurevich V., Gusev M. // Applied Optics. 2009. V.48. Is.18,20. P.3475-3480.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, К.М. ЖУМАЛИЕВ

Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек

О СКОРОСТНОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ НА ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЯХ

Исследуется теоретическая задача об особенностях проявления скрытого изображения голограммы на фототермопластических (ФТП) средах при высоком темпе нагрева. Выявлены закономерности динамики развития геометрического рельефа поверхности в зависимости от темпа нагрева и показана возможность управления информационными свойствами ФТП-среды путем выбора момента выключения нагрева и изменения мощности источника нагрева.

N.K. JAMANKYZOV, K.M. ZHUMALIEV

Institute of physical and technical problems and material science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

ABOUT THE SPEED RECORDING HOLOGRAM IN PHOTOTERMOPLASTIC CARRIERS

The theoretical task has been studied concerning the peculiarities of the hologram latent image development on photo thermoplastic (PTP) carriers at a high rate of heating. Patterns of development dynamics of the geometric topography of the surface based on the heating rate were found. The possibility to control the information properties of the PTP medium was shown by choosing the cutoff time of the heating source and regulating the power of the source.

Из решения системы одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности находится температура ФТП-пленки и его градиент по толщине слоя в приближении тонкой пленки [2], которое имеет вид

толщине слоя в приближении тонкой пленки [2], которое имеет вид
$$\frac{d\tau_1}{dz} = \frac{l_0 D_1 A_2}{\rho_1 c_1 h_1 + \rho_2 c_2 h_2} \binom{h_1}{a_1} e^{\frac{1}{\psi^2}} \Phi^* \left(\frac{1}{\psi}\right) \tag{1}$$

где параметр $\psi = \frac{\rho_1 c_1 h_1 + \rho_2 c_2 h_2}{\rho_3 c_3 \sqrt{a_3 t}}$, а I_0 , D_1 , A_2 — интенсивность нагревающего излучения, коэффициенты пропускной и поглощательной способности, $\rho_{1,2,3}$ — плотность, $c_{1,2,3}$ — удельная теплоемкость, $a_{1,2,3}$ — температуропроводность Φ TП, металлических пленок и подложки, соответственно; а функция $\Phi^* = 1 - \Phi(z)$ — функция ошибок Гаусса.

Используя свойства функции $\Phi(z > 2.7) \approx 1$, можно определить пороговую длительность облучения, при которой начинается или исчезает градиент температуры по толщине фототермопластической пленки.

$$t_{\rm rp} = \frac{1}{a_3} \left(2.7 \frac{\rho_1 c_1 h_1 + \rho_2 c_2 h_2}{\rho_3 c_3} \right)^2 \tag{2}$$

Из анализа (1) вытекает, что образование градиента температуры по толщине ФТП-слоя обуславливается только длительностью нагревающего излучения (2) и определяется исключительно теплофизическими свойствами материалов и геометрией носителя независимо от мощности нагревающего источника. Тогда изменение температуры поверхности ФТП-пленки $\mathbf{T}_{\pi}(\mathbf{t})$ со временем можно определить из соотношения

$$T_n(t) = T_1(t) + \Delta T(t) = T_1(t) + \frac{dT_1}{dz}h_1$$
 (3)

Здесь $T_1(t)$ -температура поверхности, а $T_1(t)$ как раз определяет прирост температуры поверхности за счет образованного градиента. Как видно из (3), процесс достижения до заданного значения $T_n(\tau) = T_p$ конце импульса при t = **т** зависит от вклада слагаемых. Этот момент играет существенную роль в динамике развития рельефа ФТП-поверхности, в частности при больших $\frac{d\theta}{dt} = \frac{I_0 D_1 A_2}{\rho_1 c_1 h_1 + \rho_2 c_2 h_2}$ роль догревания поверхности ФТП-пленки после выключения нагрева становится более существенным. Если имеет место $\Delta T(\tau) \geq T_1(\tau)$, то наблюдаемая дифракционная эффективность (ДЭ) записанной голограммы становится значительней, чем в случае наоборот, что наблюдается в эксперименте [1]. обстоятельства лает дополнительную оптимизировать процесс записи путем выбора момента выключения проявляющего импульса излучения, а также изменением мощности источника нагрева, в работе найдены аналитические выражения и расчетные формулы для $T_1(t)$, $\Delta T(t)$.

- 1. Баженов М.Ю., Кувшинский Н.Г., Находкин Н.Г. Проявление скрытого изображения на термопластических средах при высоких скоростях нарастания температуры. // Фундаментальные основы оптической памяти и среды. Вып.10. Киев, 1979. С.113-120.
- 2. Джаманкызов Н.К., Жумалиев Л.М. Роль лазерного нагрева в процессах формирования голограмм // ДАН Кыргызской Республики. 2014. № 1. С.45-47.

В.В. КОЛЮЧКИН, С.Б. ОДИНОКОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ

Представлена разработанная авторами методика контроля подлинности защитных голограмм, основанная на косвенном методе измерения параметров элементарных дифракционных решеток.

V.V. KOLYUCHKIN, S.B. ODINOKOV

Bauman Moscow state technical university

THE METHOD OF AUTHENTICATION SECURITY HOLOGRAMS

The method of authentication security hologram based on the indirect way of diffraction gratings parameters measurement is presented.

Радужные голограммы находят широкое применение как защитные элементы ценных бумаг, документов, а также различных изделий. В связи с этим тиражи радужных голограмм — защитных голограмм (ЗГ), исчисляются сотнями тысяч. При оперативном контроле и техникокриминалистических исследованиях документов предполагается проведение контроля подлинности голограммных и дифракционных защитных оптических элементов, составляющих основу защитных голограмм прозрачных ламинирующих пленок, расположенных на документах.

В настоящее время нет единого мнения к подходам в оценке качества ЗГ. Радужные голограммы предназначены для визуального восприятия изображений, формируемых этими элементами. Чтобы обеспечить защитные свойства радужным голограммам, на них с использованием фазовых решёток — голопикселя, формируются различные элементы дизайна, которые, как правило, имеют сложную структуру, трудно поддающуюся несанкционированному копированию.

Если предположить, что контроль подлинности осуществляется по выборочным зонам дизайна 3Γ , то контроль можно было бы свести к измерению следующих параметров дифракционной решетки (ДР):

- пространственной частоты у;
- глубины d фазового рельефа;
- количества N периодов в голопикселе;
- ориентации ф ДР.

Так как период решеток имеет значение порядка 1 мкм, то для осуществления такого контроля можно использовать метод, основанный на прямом измерении параметров дифракционных решёток, в частности, параметров формы профиля, пространственного периода и глубины с использованием микроскопов. Недостаток этого метода заключается в трудоёмкости и длительности проведения измерений параметров профиля.

Альтернативой данному методу является косвенный метод измерения. Известно, что при заданной длине волны λ распределение интенсивности по порядкам дифракции на фазовой синусоидальной отражающей дифракционной решетке зависит от глубины d рельефа ДР. При заданном значении угла падения волнового фронта значение углов дифракционных порядков зависит от пространственной частоты v. Ориентация плоскости, в которой находятся положительные и отрицательные порядки дифракции зависит от ориентации ϕ ДР. Угловой размер порядков дифракции зависит от количества периодов N в голопикселе. Следовательно, измерив значение дифракционной эффективности, а также направление и угловой размер дифракционных порядков, можно однозначно оценить параметры дифракционной решетки.

Разработана функциональная схема устройства, которое позволяет произвести измерения перечисленных параметров. О подлинности защитной голограммы можно судить, используя интегральный критерий, который характеризует отличие измеренных значений перечисленных параметров от значений параметров эталона.

- 1. Хорохоров А.М., Клищук А.М., Цыганов Й.К., Одиноков С.Б., Ширанков А.Ф. Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2005. №4.
 - 2. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
 - 3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
- 4. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. Введение в компьютерную оптику. М.: Из-во МГУ, 1991.
- 5. Бобринев В.И., Лушников Д.С., Николаев А.И., Одиноков С.Б., Цыганов И.К. Получение и считывание голограмм со скрытым изображением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2004. №1 (54).

Б.А. КУЗЯКОВ, Р.В. ТИХОНОВ, В.А. ШМЕЛЕВ

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОМЕХ В ЛАЗЕРНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КАНАЛАХ ЗЕМЛЯ – СПУТНИК

В работе приводятся оценки влияния атмосферных помех в лазерных телекоммуникационных каналах Земля – спутник. Показано, что с использованием методов коррекции, можно значительно снизить уровень влияния помех с учетом вклада атмосферы на лазерные каналы

B.A. KUZYAKOV, R.B. TIHONOV, V.V. SHMELEV

Moscow state technical university of radio-engineering, electronics and automatics

ASSESS THE IMPACT OF ATMOSPHERIC NOISE IN THE LASER TELECOMMUNICATION CHANNELS EARTH – SATELLITE

The work presents the evaluation of the impact of atmospheric noise in the laser telecommunication channels Earth – to satellite. It is shown that with the use of correction methods can significantly reduce the level of interference taking into account the contribution of the atmosphere on laser channels.

При реализации лазерной связи в открытом пространстве приходится учитывать влияние динамики атмосферных условий. Наибольшая амплитуда колебания лазерного луча в атмосфере δH , определяется выражением, приведенным в [1]. Величина δH прямо пропорциональна колебаниям показателя преломления воздуха Δn { $\Delta n = (0.9 - 2.4) \ 10^{-7}$ }, расстоянию $C^{1.5}$, пройденного лазерным лучом в атмосфере и обратно пропорциональна диаметру объемов неоднородности воздуха $a^{0.5}$ (аппроксимация — в виде сферических объемов). Сферические объемы считаются однородными со средней квадратической разностью температуры $0.03 - 0.06^{\circ}$ С. На рис. 1 приведены зависимости величин δH от С. Параметры атмосферы считаются однородными по всей трассе прохождения лазерного пучка (C = 0 - 500 м). Т. е. рассматривается некоторая средняя мощность приземной облачности. В обоих вариантах, выбран диаметр объема a = 2 см, в варианте (в-1) $\Delta n = 1.0$; в варианте (в-2)

 $\Delta n = 2,4$. Из графика видно, что при длине C = 300 м, величина Н превышает 6 см (кривая 1) и 14 см (кривая 2).

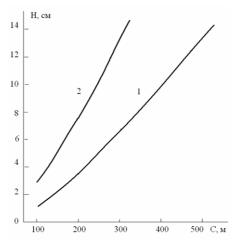


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний лазерного луча от длины пути в атмосфере при разных параметрах: 1 - вариант (в-1), 2 - вариант (в-2)

В работе рассматривается лазерная связь («вверх») наземной станции со спутником, находящимся на орбите высотой 400 км. Считая, что после прохождения атмосферы толщиной $C=500\,$ м, далее лазерный пучок распространяется прямолинейно, оценка амплитуды смещения лазерного пучка на орбите превышает $10\,$ м, даже для варианта в-1, что может привести к полной потере связи со спутником.

Анализ работ, включая [2, 3] показывает, что с использованием методов коррекции, можно значительно снизить уровень влияния помех на лазерные каналы связи Земля – спутник.

- 1. Сиротский А.А. Проектирование позиционных лазерных измерительных систем. М.: Спутник +, 2013.
- 2. Кузяков Б.А., Карпов М.А., Егорова Е.В., Тихонов Р.В., Муад Х.М. и др. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Электромагнитные волны и Электронные системы. 2013. Т.18. №12. С.38-43.
- 3. Bai S., Wang J., Qiang J., Zhang L., Wang J. Predictive filtering-based fast Reacqui-sition approach for space-borne acquisition, tracking, and pointing systems // Optics Express. 2014. V.20. No.22. P.26462-26475.

Б.А. КУЗЯКОВ, Р.В. ТИХОНОВ

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВЕТОВОДЫ ПО МОДАМ УГЛОВОГО ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА ФОТОНОВ В ОПТИЧЕСКОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЛИНИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Для повышения эффективности оптической системы телекоммуникации используются потоки фотонов с определенной модой углового орбитального момента и селективные световоды. Показано, что такие световоды расширяют возможности выбора и построения новейших систем связи с параметрами близкими к оптимальным.

B.A. KUZYAKOV, R.B. TIHONOV

Moscow state technical university of radio-engineering, electronics and automatics

SELECTIVE OPTICAL FIBERS ACCORDING TO THE FASHION OF THE ANGULAR ORBITAL MOMENTUM OF THE PHOTONS IN THE OPTICAL COMBINATION LINE TELECOMMUNICATIONS

To improve the efficiency of the optical system telecommunications are used streams of photons with a certain fashion angular orbital momentum and selective fibers. It is shown that such fibers enhance choice and build advanced communication systems with parameters close to optimal.

Для повышения эффективности [1, 2] комбинированной оптической системы телекоммуникации (КОЛС), в ряде случаев, используется поток фотонов [3] с определенной модой углового орбитального момента (УОМ). Дальнейшее совершенствование системы КОЛС связано с использованием селективных световодов. В нескольких современных работах [4, 5] показано, что при определенной конструкции, световод пропускает, с высокой эффективностью, только выбранные моды УОМ. В [4] предлагается использовать селективное волокно с инверсным (в сравнении с обычным для волоконно-оптических линий связи) параболическим градиентным распределением показателя преломления п(г) по радиусу цилиндрического волокна г.

Для анализа такого волокна удобно использовать несколько параметров: относительный контраст показателя преломления

 $\Delta=(n_1^2-n_2^2) / 2n_1^2$, параметр кривизны $N=(n_1-n_a) / (n_1-n_2)$, где n_1 -показатель преломления сердцевины волокна $(r=0-a),\ n_2$ - показатель преломления оболочки $(r>a),\ n_a$ - показатель преломления точно на границе сердцевины с оболочкой (r=a). В [4] приводится зависимость минимального эффективного показателя сепарации n^* от радиуса сердцевины г для группы УОМ мод LP11, при a=3 мкм, $\lambda=1550$ нм, $n_2=1,4440.$ На рис. 1 приведена зависимость разности n^* от радиуса сердцевины волокна $r:n^{**}=n^*$ ($\Delta n_{max}=0,07$) – n^* (($\Delta n_{max}=0,05$). Зависимость n^{**} имеет ярко выраженный экстремум в диапазоне a=1,8-2,2 мкм.

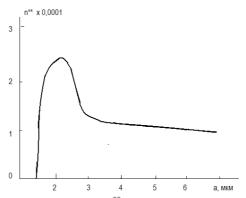


Рис. 1. Зависимость разности n** от радиуса сердцевины волокна

Анализ работ, включая [4, 5], показывает, что применение селективного волокна расширяет возможности выбора и построения новейших КОЛС с параметрами близкими к оптимальным.

- 1. Павлов Н.М. Коэффициент готовности атмосферного канала АОЛП и методы его определения // Фотон-Экспресс. 2006. №6, С.78-90.
- 2. Кузяков Б.А., Карпов М.А., Егорова Е.В., Тихонов Р.В., Муад Х.М. и др. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Электромагнитные волны и Электронные системы. 2013. Т.18. №12. С.38-43.
- 3. Gibson G., Courtial J., Padgett M., et. al. Free-space information transfer using light beams carring orbital angular momentum // Optics Express. 2004. V.12. Is.22. P.5448-5456.
- 4. Ung B., Vaity P., Wang L., Messaddeg Y., Rusch L.A., LaRochelle S. Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes // Optics Express. 2013. V.22. No.15. P.18044-18055.
- 5. Bozinovic N., Yue Y., Ren Y., Tur M., Kristensen P., et. al. Terabit-Scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers // Science. 2013. No.340(6140). P.1545 -1548.

А П ПЛЁНКИН

Южный федеральный университет, Таганрог

ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВХОЖДЕНИЯ В СИНХРОНИЗМ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Приведены методы синхронизации систем квантового распределения ключей (СКРК). Изложены характеристики процессов генерации, распределения и вхождения в синхронизм автокомпенсационных оптических систем с фазовым кодированием состояний фотонов. Предложен алгоритм, повышающий защищенность процесса синхронизации СКРК.

A.P. PLJONKIN

Southern federal university, Taganrog

IMPROVING THE SECURITY OF SYNCHRONIZATION OF QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM

Methods of quantum key distribution systems synchronization (QKDS) are adduced. The characteristics of generation, distribution and synchronization process for autocompensation optical systems with phase coding states of photons are expounded. The algorithm for adds security of synchronization process in QKDS are proposed.

Абсолютная секретность при передаче сообщений обеспечивается решением проблемы распределения ключей. Актуальным физическим воплощением проблемы распределения ключей является квантовая криптография, методы которой реализованы в системах квантового распределения ключей. В основе принципа действия СКРК лежит механизм кодирования квантового состояния одиночной частицы [1, 2].

Среди успешно реализованных коммерческих квантовых оптоволоконных криптографических систем особо выделяются двухпроходные автокомпенсационные оптические СКРК с фазовым кодированием [3], которые отличаются устойчивой работоспособностью при изменяющихся внешних факторах.

Одной из составляющих для обеспечения эффективной работы СКРК является процесс синхронизации, заключающийся в определении момента регистрации фотонного импульса. Проблемы временной синхронизации исследованы для каналов с аддитивными гауссовскими шумами [4]. В [5]

описаны алгоритмы синхронизации оптических систем, принцип действия которых основывается на регистрации многофотонных импульсов.

Механизм синхронизации в двухпроходных автокомпенсационных оптических СКРК с фазовым кодированием описан в [6]. Здесь для обеспечения синхронизма в СКРК с высокой точностью определяется общая длина оптического пути распространения фотонного импульса, включающая волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) между двумя модулями СКРК и длины всех оптических компонентов СКРК.

Процессы генерации и распределения квантовых ключей проходят в однофотонном режиме. Среднее число фотоэлектронов на импульс при этом составляет порядка 0,1. Однако процесс синхронизации реализуется в многофотонном режиме, что потенциально позволяет злоумышленнику использовать часть энергии для синхронизации своей аппаратуры.

Исследован алгоритм поиска фотонного импульса в режиме синхронизации СКРК, обеспечивающий повышенную защищённость от несанкционированного съёма информации. Оценено влияние параметров аппаратуры поиска СКРК на вероятность правильного обнаружения сигнального временного окна в процессе синхронизации. Особенностью алгоритма является использование лавинного фотодиода (ОЛФД) в однофотонном режиме регистрации фотонных импульсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ. Тема № 213.01-11/2014-9.

- 1. Bennet C.H., Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // Proc. of IEEE Int. conf. on Comput. Sys. And Sign. Proces. Bangalore, India, 1984. P.175–179.
- 2. Румянцев К.Е. Системы квантового распределения ключа: Монография. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2011.
- 3. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // Reviews of Modern Physics. 2002. V.74. №1. P.145-195.
 - 4. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. М.: Связь, 1971.
- 5. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь / пер. с англ. под ред. А.Г. Шереметьева. М.: Связь. 1978.
- 6. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8. С.81-96.

Ю.В. ЗАЧИНЯЕВ

Южный федеральный университет, Таганрог

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛА ФОРМИРОВАТЕЛЯ ЛЧМ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Рассмотрены вопросы анализа и экспериментальной оценки функционирования бинарной волоконно-оптической структуры как основы формирователя ЛЧМ-сигналов

Yu.V. ZACHINYAEV

Southern federal university, Taganrog

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FIBER-OPTIC BASED CHIRP GENERATOR UNIT

The problems of analysis and experimental evaluation the binary fiber-optic structure functioning as the basis of the chirp generator.

В [1] предложены структура устройства и метод формирования линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов на основе бинарных волоконно-оптических структур (БВОС).

Целью проведения экспериментальных исследований, которые осуществлялись на макете однокаскадной БВОС, являлось снятие экспериментальных характеристик БВОС, а также уточнение требований, предъявляемой к используемой элементной базе.

В качестве экспериментальных характеристик БВОС, исследуемых в ходе исследования, был выбран параметр неидентичности формирования копий БВОС δ. Конфигурация макета БВОС для исследования уровня неидентичности формирования копий БВОС приведена на рис. 1.

Результаты экспериментальных испытаний для двух волоконнооптических линий связи (ВОЛС) разной длины приведены в табл. 1.

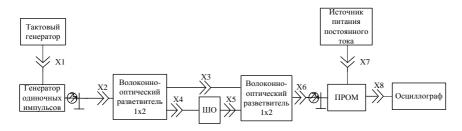


Рис. 1. Конфигурация макета БВОС для измерения неидентичности формирования копий

Таблица 1. Измеренная неидентичность копий БВОС

№ исп.	Объект испытания	Ампл. 1 копии U_1	Ампл. 2 копии \boldsymbol{U}_2	Значение б, дБ
1	БВОС с ВОЛЗ дл. 2 м	1,84 мВ	1,54 мВ	0,77 дБ
2	БВОС с ВОЛЗ дл. 20 м	1,84 мВ	1,49 мВ	0,91 дБ

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения высокого уровня идентичности формирования копий в БВОС целесообразно использовать последние, выполненные по планарной технологии, обеспечивающие максимально точное разветвление оптического сигнала.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ. Тема № 213.01-11/2014-9.

Список литературы

1. Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е., Кукуяшный А.В. Формирование наносекундных ЛЧМрадиосигналов на волоконно-оптических структурах // Электротехнические и информационные системы и комплексы. 2011. Т.7. №3. С.32-38.

И.Л. ВИНОГРАДОВА, А.Х. СУЛТАНОВ, И.К. МЕШКОВ, А.В. АНДРИАНОВА, Г.И. АБДРАХМАНОВА, Е.П. ГРАХОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПОДХОД К ПРЕОБРАЗОВАНИЮ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ СИСТЕМЫ R₀F

Предлагается устройство для преобразования спектра сверхширокополосного сигнала оптической частью системы Radio-over-Fiber. Устройство основано а двух резонаторах Фабри — Перро с дополнительными оптическими каналами. Устройство обеспечивает избирательность спектральных компонентов входного излучения, что позволяет управлять чирпом сигнала.

I.L. VINOGRADOVA, A.K. SULTANOV, I.K. MESHKOV, A.V. ANDRIANOVA, G.I. ABDRAKHMANOVA, E.P. GRAKHOVA Ufa state aviation technical university

THE APPROACH OF SPECTRUM ULTRA-WIDE BAND SIGNAL TRANSFORMATION BY OPTICAL PART OF ROF

The device for spectrum ultra-wide band signal transformation by optical part of radio-over-fiber system is offered. The device is based on two Fabry–Perot resonators with additional fiber optical channels. If to execute the amalgamator made of erbium doped material, the device will supply amplification of a target signal. The device provides selectivity of spectral components of entrance radiation, that allows to operate the chirp.

В настоящее время набирают всё большую популярность волоконнооптические мультисервисные системы абонентского доступа, в том числе - системы связи с применением радиодоступа, или Radio-over-Fiber (RoF) [1]. Особенно интересны те, которые работают с широкополосным (ШП) сигналом – ввиду его высокой информационной ёмкости. Для такой категории RoF преобразование параметров сигнала (прежде всего спектра разрешённую маску ГКРЧ) оптическим под представляется актуальным из-за существенно большей дороговизны, а зачастую и громоздкости, выполнения аналогичных преобразований средствами электроники и радиотехники. Для решения такой задачи, может быть использовано многорезонаторное волоконно-оптическое интерференционное устройство (рис. 1), обеспечивающее как исключение «ненужных» спектральных составляющих, так и расширяющее заданные области спектра за счёт чирпирования. Причём последнее выполняется как посредством смещения соответствующих спектральных областей (задержкой) под действием интерференции при подобранных параметрах l_0 , $l_{0,k}$ и l_k , так и генерацией дополнительных составляющих с привлечением нелинейных оптических эффектов — фазовой кросс- и самомодуляции в легированной смесительной области устройства при подаче информационного сигнала по каналу 1, а накачки — по каналу 2.

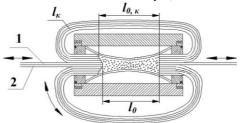


Рис. 1. Волоконно-оптическое устройство для преобразования сигнала

Моделирование параметров устройства [2] показало, что при $l_0=2,5$ мм и $l_k\cong 47...57$ мм коэффициент отражения зеркал интерферометра достаточно взять равным $\rho\cong 0,1...0,4$, что обеспечивает вполне приемлемое качество передачи импульсного сигнала и выполняет задержку спектральных составляющих до величины порядка 5500 пс/нм. В отличие от [2], предлагается использовать устройство не в проходящем, а в отражённом свете, дополнительно снабдив его входной циркуляторной схемой, а также с обеспечением градиента $\rho(r)$ по радиусу зеркал. Это позволит инвертировать его передаточную функцию, имеющую вид модифицированной функции Эйри, а значит — эффективно «вырезать» запрещённые спектральные области, подстраивая (для каждой области — по-своему) ширину соответствующего резонанса вариацией параметров $l_{0,k}$ и l_k , а также и $\rho_k(r_k)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках договоров № 14.574.21.0058 и базовой части гос. заданий образ. организац. высшего образов. №2014/240.

- 1. Abraha S.T. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. Ph. D. thesis. 2012.
- 2. Султанов А.Х., Виноградова И.Л., Кашбиев А.А. Моделирование параметров волоконно-оптического интерференционного устройства преобразования параметров сигнала // Электросвязь. №2. 2013. С.38-42.

И.Л. ВИНОГРАДОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ НЕРЕЛЯЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

Предлагается использование оптических свойств сигналов, в частности, функции чирпа, для переноса метки управления в короткосегментных оптических телекоммуникациях. Такая метка позволит сэкономить традиционный сетевой ресурс наряду с обеспечением низкого уровня управления.

I.L. VINOGRADOVA

Ufa state aviation technical university

THE APPLICATION OF OPTICAL PULSES FREQUENCY MODULATION FOR NON-RELATION MANAGEMENT OF FIBER OPTICAL NETWORKS

The optical signal property for transfer label of network management is offered. The chirp function of an optical pulse is considered. This label provides to save traditional network resources along low management of physical level. Proposed method provides a height speed of data processing in Metropolitan Area Networks.

Олним ИЗ направлений развития высокопроизводительных телекоммуникационных систем является внедрение «интеллектуальной базы» на нижних сетевых уровнях, в том числе - на уровне волоконнооптической линии передачи (ВОЛП), что означает управление информационным сигналом посредством использования оптических устройств ВОЛП. Примером может служить GMPLS, позволившая ускорить быстродействие сети за счёт снижения уровня, на котором выполняется маршрутизация [1]. Но весьма расточительно тратить для управления такой сетевой ресурс, как λ-канал, следовательно, необходим поиск оптических свойств сигналов, пока к настоящему времени не задействованных в качестве информационного носителя. С этой точки зрения исследуется возможность применения частотной модуляции оптических импульсов (в частном случае – функции чирпа $C_{\omega}(T)$, где T – собственное время импульса) для нереляционного переноса своеобразной «метки» управления в короткосегментных сетях категории «городские сети» MAN (Metropolitan Area Networks), и логических устройств преобразования этой «метки».

Так, например, использование эффектов фазовой само- и кроссмодуляции [2] позволяет фактически выполнить преобразование вида: огибающая оптической мощности $P_{\rm BX}(T)$ (т.е. форма сигнала) \leftrightarrow функция $C_{\rm oo}(T)$ при соответственном подборе/задании формы $P_{\rm BX}(T)$. Полагая малое снижение амплитуды сигнала в компонентах преобразования/управления (рис. 1) сетью, и используя решение для продольной составляющей A(z,T) электрической напряжённости поля световой волны [2], получаем:

$$C_{\omega}(z) = -2\gamma P_0 \cdot \left[\left| \frac{dA(0,T)}{dT} \right| \cdot \frac{dA(0,T)}{dT} + \left| A(0,T) \right| \cdot \frac{d^2A(0,T)}{dT^2} \right] \cdot \Delta T \cdot z ,$$

где γ — коэффициент нелинейности рабочей области устройства, P_0 — пиковая входная мощность и z — продольная координата.

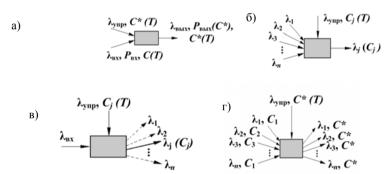


Рис. 1. Схемы функционального преобразования: приобретение заданного C^* и/или уровня мощности, зависимого от C^* (а); выбор длины волны λ_j из заданного набора, соответствующей j-ой функции C^*_j (б); преобразование $\lambda_{\rm BX}/\lambda_j$ в зависимости от C_j (в); функция «копирования чирпа», передаваемого всем λ -каналам от управляющего сигнала (г)

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части государственных заданий образовательным организациям высшего образования (договор № 2014/240).

- 1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
 - 2. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 2001.

В.Ю. РЯБЧЁНОК, А.Д. БЕЗПАЛЫЙ, А.О. ВЕРХОТУРОВ, А.Н. ТИМОФЕЕВ, А.В. АБРАМОВА, А.А. ЕРЕМЕЕВА, В.М. ШАНДАРОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА НИОБАТА ЛИТИЯ В ВОЛНОВОДНОМ СЛОЕ

В работе исследуется влияние интенсивного лазерного излучения на оптические характеристики ниобата лития в планарных волноводах, созданных на поверхности фоторефрактивных и нефоторефрактивных образцов. В экспериментах локальные области образцов экспонировались лазерным излучением с длиной волны 532 нм и интенсивностью до 100 кВт/см².

V.Yu. RYABCHENOK, A.D. BEZPALY, A.O. VERKHOTUROV, A.N. TIMOFEEV, A.V. ABRAMOVA, A.A. EREMEEVA, V.M. SHANDAROV

Tomsk state university of control systems and radioelectronics

INVESTIGATION OF INTENSIVE LASER RADIATION INFLUENCE ON LITHIUM NIOBATE PROPERTIES WITHIN A WAVEGUIDE LAYER

The influence of intensive laser radiation on optical characteristics of lithium niobate is studied within planar waveguides formed at the surfaces of both, photorefractive and non-photorefractive samples. The local parts of these samples were exposed by laser radiation with wavelength of 532 nm and light intensity up to 100 kW/cm².

Как известно, сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией, существенно изменяющейся под влиянием внешних воздействий (высокая температура, внешнее электрическое поле, превышающее коэрцитивное поле). [0]. Целью данной работы явилось исследование влияния интенсивного излучения видимого диапазона на величину спонтанной поляризации сегнетоэлектрического кристалла ниобата лития в экспонируемой области волноводного слоя.

Исследуемый образец представлял собой пластину ниобата лития Zсреза, легированную ионами железа по объему. Размеры образца по осям $X \times Y \times Z$ составляли $11 \times 10 \times 1,5$ мм³ соответственно. Для экспонирования использовалось излучение YAG:Nd $^{3+}$ лазера с удвоением частоты, длина волны λ =532 нм, интенсивность света могла достигать 100 кВт/см 2 , диаметр светового пятна на входной плоскости образца изменялся от 10 до 3 мкм. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Л - лазер; СК - светоделительный кубик; МО - микрообъектив; НЛ - образец ниобата лития; АЛП - анализатор лазерных пучков

Время экспонирования в разных экспериментах достигало нескольких минут. Изменение распределения интенсивности света на выходной плоскости образца наблюдалось при помощи анализатора лазерных пучков. Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 2.

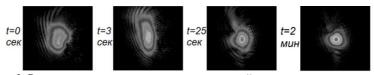


Рис. 2. Распределение светового поля на выходной грани кристалла в разные моменты времени

Здесь на первом этапе наблюдается увеличение дифракционной расходимости светового пучка (t=3 с). Затем наблюдается эффект самофокусировки, что может быть связано с вкладом пироэлектрического эффекта в нелинейный отклик среды. Изменение параметров кристалла изучалось также путем зондирования экспонированной области излучением гелий-неонового лазера.

Список литературы

1. Steigerwald H., von Cube F., Luedtke F., Dierolf V., Buse K. Influence of heat and UV light on the coercive field of lithium niobate crystals. «Springer Verlag», 2010.

С.М. КОСТРИЦКИЙ, Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ, О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ 1 , И.М. ЧИРКОВА 1

 $H\Pi K$ Оптолинк, Зеленоград 1 Кемеровский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОТОННО-ОБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ В КРИСТАЛЛАХ LINbO₃

Установлено, что электрооптические свойства волноводов зависят от их фазового состава. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления фазовых модуляторов на основе канальных волноводов в кристаллах LiNbO₃.

S.M. KOSTRITSKII, Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV, O.G. SEVOSTYANOV¹, I.M. CHIRKOVA¹

RPC Optolink Ltd, Zelenograd

¹Kemerovo state university

STUDY OF ELECTROOPTICAL PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF PROTON-EXCHANGED WAVEGUIDES IN Linbo₃ CRYSTALS

Electrooptical properties of the waveguides have been found to be depending on their phase composition that was changed intentionally by variation of technological conditions. These experimental findings allowed to make the optimization of technology for production of phase modulators based on channel waveguides in LiNbO₃ crystals.

Для прямого измерения эффективных значений электрооптических (ЭО) коэффициентов, были изготовлены ЭО фазовые модуляторы на основе канальных протонно-обменных (ПО) волноводов на пластинах Z-среза LiNbO₃ толщиной 1 мм. Оптическая структура фазового модулятора представляет собой прямой канальный волновод с шириной канала 6 мкм. Электродная структура состоит из двух электродов, находящихся в одной плоскости с волноводом. ЭО эффективность фазовых модуляторов измеряли с помощью волоконного интерферометра Саньяка, использующего суперлюминесцентный диод с центральной длинной волны ~1550 нм (ширина полосы излучения 50 нм).

Было установлено, что высокая ЭО эффективность и, следовательно, наибольшее значение ЭО коэффициента r_{13} наблюдаются у модуляторов на основе сильно отожжённых ПО а-фазных волноводов с небольшим приращением необыкновенного показателя преломления $\Delta n_{\rm e} \le 0.01$ (фаза а* [1]). В тоже время, модуляторы на основе волноводов с высоким значением $\Delta n_e \geq 0.012$ демонстрируют меньшие значения r_{13} , (фаза α^{**} [1]). Однако, такие волноводы с высоким $\Delta n_{\rm e}$ весьма интересны для практического применения, так как локализация фундаментальной волноводной моды в этих волноводах значительно лучше, чем в волноводах с небольшим Δn_e [1]. Слабая локализация мод вызывает значительные оптические потери при изгибах волновода, например на участках У-разветвления, в реальных электрооптических устройствах, таких как многофункциональные интегрально-оптические элементы [2]. Поэтому условия изготовления при использовании отожжённого протонного обмена выбирались нами таким образом, чтобы получить канальный волновод с $0.012 \le \Delta n_e \le 0.015$.

Применение влажного воздуха для постобменного отжига, как ожидается, может улучшить ЭО свойства волноводов с большим значением Δn_e , так как ИК-спектроскопия отражения демонстрирует значительное снижение разупорядочения в приповерхностном слое при изменении атмосферы отжига [3]. Действительно, наше сравнительное исследование показало, что ПО волноводы, полученные отжигом во влажной атмосфере и содержащие а** фазу, имеют оптимальное сочетание оптических потерь и 90 коэффициентов r_{13} для практического применения. Для определения фазового состава канальных ПО волноводов мы использовали спектроскопию микро-КРС, так как спектры КРС различных фаз существенно отличаются друг от друга [1], а использование конфокального микроскопа в микро-КРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение (около 1 мкм), достаточное поперечного лля детального исследования профиля волноводов и интегрально-оптических схем на их основе.

- 1. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. Electro-optical properties of different $H_x Li_{1-x} NbO_3$ phases in proton-exchanged LiNbO3 waveguides // Ferroelectrics. 2012. V.440. P.47-56.
- 2. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. Optimization of multi-function integrated optics chip fabricated by proton exchange in LiNbO₃ // Proc. SPIE. 2013. V.9065. P.90650E.
- 3. Muller H.G., Stapleton A.D., Foran B.J., Radhakrishnan G., Kim H.I., Adams P.M., Lipeles R.A., Herman P. Reduction of lattice defects in proton-exchanged lithium niobate waveguides // J. Appl. Phys. 2011. V.110. P.033539.

В.Д. ПАРАНИН, Е. ПАНТЕЛЕЙ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва

СПЕКТР ПРОПУСКАНИЯ НИОБАТА ЛИТИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

В работе исследованы спектры пропускания кристаллов ниобата лития х-срезов различных производителей в спектральной области 400 нм – 25 мкм.

V.D. PARANIN, E. PANTELEI

S.P. Korolyov Samara state aerospace university

SPECTRUM TRANSMISSION OF LITHIUM NIOBATE DIFFERENT PRODUCERS

We studied the transmission spectra of lithium niobate crystals of different producers in the field of broadband 400~nm-25~microns.

Цель работы: исследование возможностей измерения содержания примесей и оценки качества кристаллов ниобата лития методом широкополосной спектроскопии пропускания.

Исследовались кристаллы следующих фирм: Sipat, CQT, CT и ЭЛАН+. Измерения производились на спектрофотометрах Shimadzu UV-2450и Shimadzu IR Prestige 21.

Кристаллы СQT, Sipat, ЭЛАН+ имеют приблизительно одинаковую интенсивность пропускания 72-76% в диапазоне от 550 нм. Кристалл СТ имеет существенно лучшее пропускание во всем диапазоне длин волн, особенно хорошо это видно в ближней и средней области.

В среднем инфракрасном диапазоне имеется несколько пиков поглощения у всех кристаллов. По характерным длинам волн, соответствующих локальным минимумам пропускания, можно судить о примесях присутствующих в НЛ. Например, впадина на длине волны 2840-2900 нм соответствует Н2 в решетке кристалла [2], который проникает при росте кристалла в воздушной атмосфере.

Зависимость поглощения примесей от длины волны делает возможным как качественный, так и количественный анализ. Для корректности исследования необходимо учесть существенное отличие стехиометрического и композиционного состава поверхностного слоя.

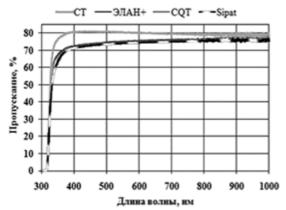


Рис. 1. Спектры ниобата лития в диапазоне 300 – 1000 нм

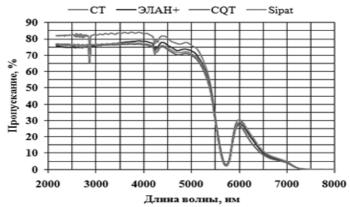


Рис. 2. Спектры ниобата лития в ближнем и среднем диапазоне

Использованный метод спектроскопии пропускания пригоден для неразрушающего контроля содержания примесей в кристаллах ниобата лития. В качестве критериев оценки лучше использовать линейное поглощение кристаллов, компенсируя отличие их толщин.

- 1. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000.
- 2. Колесников О.М., Кострицкий С.М. Водород в ниобате лития // Автометрия. 1995. №4. С.60-67.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ¹, М.Н. ПАЛАТНИКОВ¹

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск ¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СХОДЯЩИХСЯ ЛУЧЕЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ Linbo₃:Gd

Методом лазерной коноскопии получены интерференционные картины монокристаллов LiNbO $_3$:Gd, которые позволяют оценить оптическую однородность исследуемых образцов.

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV¹, M.N. PALATNIKOV¹

Far Eastern state transport university, Khabarovsk

¹I.V. Tananaev institute of chemistry and technology of rare elements and mineral raw
materials of Kola science center of the RAS, Apatity

CONVERGENT BEAM INTERFERENCE IN THE SINGLE CRYSTALS LinbO₃:Gd

By laser conoscope method obtained the interference patterns of single crystals $LiNbO_3$:Gd, which allow us to estimate the optical homogeneity of the test samples.

Для проведения коноскопических исследований [1,2] использовались сравнительно слабо легированные кристаллы LiNbO $_3$:Gd [0,002 - 0,005 мас.%] и кристаллы с более высокой концентрацией примеси LiNbO $_3$: Gd [0,26 - 0,51 мас.%], вырезанные из различных частей кристаллической були.

Коноскопический анализ относительно слабо легированных образцов LiNbO₃:Gd [0,002-0,005 мас.%] в целом показывает отсутствие аномальной двуосности в объеме монокристаллов, но отмечаются незначительные искажения на коноскопических картинах (рис. 1а-г).

Анализ коноскопических картин монокристаллов с более высокой концентрацией примеси $LiNbO_3$:Gd $[0,26-0,51\ \text{мас.\%}]$ показывает, что с увеличением процентной концентрации примеси аномальная двуосность в указанных образцах проявляется в значительно большей степени.

Так, например, коноскопические картины монокристалла LiNbO $_3$:Gd [0,26 мас.%] демонстрируют наличие двуосности по всей плоскости входной грани образца, что проявляется разрывом и просветлением в

центре креста (рис. 1д). При этом направление деформации индикатрисы происходит в одном и том же вертикальном направлении.

Коноскопические картины монокристалла LiNbO₃:Gd [0,44 мас.%] демонстрируют более разнообразные искажения и отличия от коноскопических картин одноосных кристаллов (рис. 1e), а именно: отсутствие круговой симметрии, искажение формы изохром при переходе через ветви «мальтийского креста» и их различная кривизна в пределах каждого из четырех квадрантов. Углы между изогирами, формирующими «мальтийский крест» со слабым просветлением в центре, отличаются от прямых.

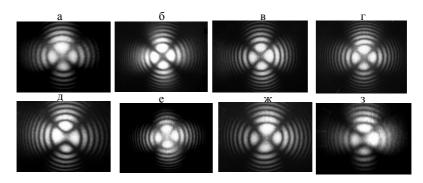


Рис. 1. Коноскопические картины LiNbO₃:Gd: [0,002 мас. %] (а); [0,003 мас. %] (б), (в); [0,005 мас. %] (г); [0,26 мас. %] (д); [0,44 мас. %] (е); [0,51 мас. %] (ж), (3)

Наблюдение коноскопических картин монокристалла с самым большим содержанием примеси $LiNbO_3$:Gd [0,51 мас.%] показывает признаки, типичные для двуосных кристаллов (рис. 1ж, 3), а именно – трансформацию изогир из колец в эллипсы и деформацию «мальтийского креста» с просветлением и разрывом на две части с их сдвигом в азимутальном направлении от центра. Отмечаются два направления сдвига частей «мальтийского креста» — горизонтальное (рис. 1ж) и вертикальное (рис. 13), что соответствует направлению деформации оптической индикатрисы кристалла.

- 1. Pikoul O.Yu. Determination of optical sign of a crystal by conoscopic method $/\!/$ J. Appl. Cryst. 2010. V.43. P.949-954.
- 2. Palatnikov M., Pikoul O., Sidorov N., Makarova O., Bormanis K. Conoscopic studies of optical homogeneity of the LiNbO₃:Mg crystals // Ferroelectrics. 2012. V.436. №1. P.19-28.

В.А. ЛИТВИНОВА, В.А. ЛИТВИНОВ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск ¹Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный

МОДЕЛИРОВАНИЕ АПКОНВЕРСИИ В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ

В работе проведено моделирование апконверсии широкополосного инфракрасного излучения в нелинейных кристаллах. Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с результатами эксперимента.

V.A. LITVINOVA, V.A. LITVINOV¹

Far Eastern state transport university, Khabarovsk ¹Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny

MODELING OF UPCONVERSION IN NONLINEAR CRYSTALS

This paper presents the modeling of upconversion of broadband infrared radiation in nonlinear crystals. It is shown that the simulated and experimental results are in good agreement.

Апконверсия в нелинейном кристалле представляет интерес для визуализации инфракрасного излучения при комнатной температуре с последующей регистрацией и анализом излучения в видимом диапазоне.

Целью данной работы является компьютерное моделирование процессов апконверсии расходящихся пучков широкополосного инфракрасного излучения нелинейных кристаллах. Спектры преобразованного широкополосного инфракрасного излучения нелинейных кристаллах были рассчитаны учетом векторных взаимодействий световых пучков и условий эксперимента.

При распространении пучка широкополосного инфракрасного излучения в нелинейном кристалле в направлении фазового согласования для одной из входящих частот происходит генерация суммарной частоты и второй гармоники. Волны с частотами $\omega_1=\omega_3/2-\Omega$ и $\omega_2=\omega_3/2+\Omega$, равноотстоящие от $\omega_3/2$ на некоторый частотный интервал Ω , дают вклад в генерируемую волну с частотой ω_3 .

При расчете интенсивности спектров апконверсии широкополосного инфракрасного излучения необходимо учитывать векторные

взаимодействия световых лучей по всем возможным направлениям в пределах углового интервала падающего пучка [1-5]:

$$I_{3}(\omega_{3}) = A \int_{\theta-\alpha}^{\theta+\alpha} \int_{0}^{\alpha} \int_{0}^{\omega_{3}/2} I_{1}(\omega_{1}) I_{2}(\omega_{2}) \frac{\sin^{2}(\Delta k z/2)}{(\Delta k/2)^{2}} d\Omega d\alpha' d\theta', \qquad (1)$$

где A — коэффициент, пропорциональный квадрату компоненты тензора нелинейной восприимчивости кристалла, $I_1(\omega_1)$ и $I_2(\omega_2)$ — интенсивности взаимодействующих волн основного излучения, z — длина кристалла в направлении распространения излучения, θ — угол фазового согласования для частоты $\omega_3/2$ относительно оптической оси кристалла, α — угол расходимости входящего пучка; Δk — волновая расстройка:

$$\Delta k = \frac{1}{c} \left[\frac{\omega_3}{2} (n_1 + n_2 - 2n_3) + \Omega(n_1 - n_2) \right], \tag{2}$$

где $n_1(\omega_1)$, $n_2(\omega_2)$, $n_3(\omega_3)$ — показатели преломления, зависящие от поляризации и направления волн, распространяющихся в кристалле.

Интенсивность преобразованного широкополосного излучения на выходе кристалла определяет результирующий спектр преобразованного излучения.

Моделирование апконверсии широкополосного инфракрасного излучения проводилось с помощью специальной программы.

Спектры инфракрасного излучения, преобразованного в нелинейном кристалле, полученные при соответствующих условиях, хорошо согласуются с теоретически рассчитанными спектрами.

- 1. Гайнер А.В. Нелинейно-оптические преобразователи инфракрасного излучения Новосибирск: Наука. 1990.
- 2. Кривощеков Г.В., Колпаков Ю.Г., Самарин В.И., Строганов В.И. Преобразование оптического излучения с широким спектром в нелинейных кристаллах // Журнал прикладной спектроскопии. 1979. Т.30. №5. С.884–889.
- 3. Строганов В.И., Троилин В.И. Преобразование немонохроматического широкополосного ИК-изображения в нелинейных кристаллах иодата и формиата лития // Журнал прикладной спектроскопии. 1989. Т.50. №2. С.297–301.
- 4. Толстов Е.В., Криштоп В.В., Строганов В.И., Доронин В.И., Литвинова М.Н., Ющенко Н.Л. Температурные характеристики преобразователя излучения на основе нелинейно-оптического кристалла // Известия вузов. Приборостроение. 2004. №10. С.74—77.
- 5. Litvinova M.N., Krishtop V.V., Tolstov E.V., Troilin V.I., Ålekseeva L.V., Litvinova V.A. Upconversion of broadband infrared radiation into visible light for different pumping parameters // Journal of Spectroscopy. 2013. V.2013. P.631510.

А.И. ГРИБЕНЮКОВ, Г.А. ВЕРОЗУБОВА, А.О. ОКУНЕВ 1

ПОЛУЧЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ZnGeP₂ И ЕГО СВОЙСТВА

Работа посвящена нелинейно-оптическому инфракрасному материалу $ZnGeP_2$. Обсуждается синтез, рост, постростовые обработки, и структурное совершенство таких кристаллов для использования в нелинейной оптике. Кристаллы имеют величину коэффициента оптического поглощение для o-луча ~ 0.03 -0.02 см⁻¹ на ллине волны 2.06 мкм

A.I. GRIBENYUKOV, G.A. VEROZUBOVA, A.O. OKUNEV¹

Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod state university, Veliky Novgorod

PREPARATION OF NONLINEAR OPTICAL MATERIAL $ZnGeP_2$ AND ITS PROPERTIES

This contribution is devoted to nonlinear optical compound $ZnGeP_2$. Synthesis, growth and structural perfection are discussed to be used these crystals in nonlinear optics. Our crystals have absorption coefficient for o-ray ~ 0.03 -0.02 cm⁻¹ at 2.06 mkm.

Монокристаллы соединения ZnGeP₂ нелинейно-оптического материала среднего ИК-диапазона - характеризуются уникальным набором физических свойств. позволяющих создавать высокоэффективные преобразователи излучения лазерных источников с длиной волны ~2 мкм в излучение спектрального интервала 3-8 мкм. практических приложений этого материала в различных Потенциал (эффективность и мощностные параметры областях науки и техники преобразователей частоты оптического излучения) в значительной степени определяется длинноволновым «хвостом» поглощения света собственными точечными дефектами В области 2 - 2.5MKM. обусловленными отклонением состава кристаллов от стехиометрии. Путем термообработки и облучения быстрыми электронами коэффициент поглощения точечными дефектами в ZnGeP2 для области ~2 мкм можно 0.02 - 0.03CM-1, обеспечивающего снизить ДΟ уровня эффективность параметрического преобразования частоты лазерного излучения, однако ослабление света (поглощение рассеяние)

структурными дефектами более высокой размерности, способное вызвать деградацию эффективности нелинейных оптических элементов, практически не исследовано.

В данной работе описаны метод синтеза и выращивания монокристаллов $ZnGeP_2$, результаты исследований влияния постростовых обработок на свойства кристаллов. Модификации оптических свойств материала проводилась путем термических отжигов и облучения электронами с высокой энергией с целью последующего применения кристаллов в нелинейно-оптических преобразователях. Представлены данные по структурному совершенству кристаллов и его дефектам, а также данные по оптическому поглощению.

Для синтеза соединения $ZnGeP_2$ используется неизотермический двухзонный метод, позволяющий получать более 500 граммов за один процесс. В настоящее время разработанный метод является самым высокопроизводительным в мире. Монокристаллы $ZnGeP_2$ выращиваются по Бриджмену в вертикальном варианте с затравочными кристаллами снизу. Диаметр выращенных кристаллов варьировался от 24 до 47 мм, длина 100-200 мм (в зависимости от веса загрузки).

Многочисленные исследования кривых качания показали, кристаллы имеют очень высокое структурное совершенство: полуширина линии кривой качания на полувысоте максимума (ПШВП) составляет не более 12-35 угловых секунд и зависит от месторасположения образца в слитке. Достигнутые результаты в выращивании кристаллов ZnGeP2 с совершенной структурой позволили также зарегистрировать наличие эффекта Бормана и применить метод рентгеновской топографии на основе этого эффекта. В работе рассматриваются особенности контраста от выявленных дефектов структуры ZnGeP₂: выявлены различной природы (в среднем их плотность падает от начала слитков к концу от 2×10^3 cm⁻² до 2.5×10^2 cm⁻²) и полосы роста. В очень немногих кристаллах наблюдается контраст, выявляемый также микроскопией, от полукогерентных включений вторых фаз, связанных со нестехиометрией состава расплава при выращивании. Такие кристаллы не используются в оптических экспериментах. В состоянии "as-grown" кристаллы имеют, как правило, оптическое поглощение ~ 0.3 см⁻¹ на длине волны 2.06 мкм для oлуча. После термического отжига поглощение можно уменьшить до 0.1-0.07 см⁻¹. Более сильное уменьшение поглощения достигается за счет облучения (радиационного отжига) образцов ZnGeP2 электронами с энергией около 4 MeV, до 0.02-0.03 см⁻¹.

M.A. ACAЛXAHOBA^{1,2}, P.B. POMAШКО^{1,2}

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

ВЛИЯНИЕ ГИРОТРОПИИ НА ДВУХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММАХ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Представлен теоретический анализ влияния гиротропии на эффективность записи динамических голограмм, сформированных при ортогональном двухволновом взаимодействии в фоторефрактивных кристаллах (ФРК) СdTe и ВТО. Исследована зависимость глубины модуляции интенсивности фазовомодулированной объектной волны от длины взаимодействия.

M.A. ASALKHANOVA^{1,2}, R.V. ROMASHKO^{1,2}

¹Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok ²Far-Eastern federal university, Vladivostok

INFLUENCE OF OPTICAL GYROTROPY ON TWO-WAVE MIXING AT DYNAMIC HOLOGRAM IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL

The theoretical analyze of the gyrotropy influence on the efficiency of record of dynamic hologram is presented. The dynamic hologram is formed by orthogonal two-wave mixing in photorefractive crystals (PRC) CdTe and BTO. Dependence of modulation depth on the interaction length is studied.

В настоящей работе представлен теоретический анализ влияния оптической активности кристаллов на эффективность записи динамических голограмм в ФРК [1]. В основу анализа легла модель ортогонального взаимодействия объектной волны с опорной в кристаллах СdTe и BTO [2,3]. В качестве критерия оценки влияния гиротропии выбрана глубина модуляции интенсивности объектной волны после взаимодействия.

Фазово-модулированная линейно-поляризованная объектная волна распространялась в ФРК вдоль оси [100]. Опорная волна с круговой поляризацией распространялась вдоль оси [001]. Удельное оптическое вращение кристаллов было принято равным 6,3 град/мм и искусственно «включалось» в негиротропном кристалле CdTe либо «выключалось» в оптически активном кристалле BTO.

На рис. 1 представлены численно смоделированные зависимости модуляции интенсивности объектного пучка после взаимодействия от длины кристалла.

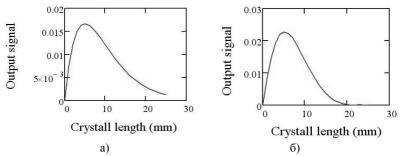


Рис. 1. Зависимость модуляции интенсивности объектной волны в кристалле CdTe без гиротропии (а) и с искусственно «включенной» гиротропией (б)

Выходной сигнал в кристалле CdTe без гиротропии достигает максимума (0,018) на длине взаимодействия в 6 мм. Если гиротропия "включена", максимум выходного сигнала, наблюдаемый на той же длине 0.023.взаимодействия, становится равным В случае оптически неактивного кристалла BTO максимум глубины модуляции интенсивности достигает 0,04 при длине взаимодействия, равной 20 мм, в то время как для гиротропного ФРК почти такой же уровень выходного сигнала (0,037) достигается в девятимиллиметровом кристалле.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых систем и устройств адаптивной интерферометрии и динамической голографии на основе динамических голограмм в ФРК.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-01122).

- 1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
- 2. Sturman B.I., Podivilov E.V., Ringhofer K.H., Shamonina E., Kamenov V.P., Nippolainen E., Kamshilin A.A. Theory of photorefractive vectorial wave coupling in cubic crystals // Physical Review E. 1999. V.60(3). P.3332.
- 3. Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Kamshilin A.A.. Optimal geometry for fast and efficient hologram recording in photorefractive crystal // Optical Review. 2007. V.14(4). P.176-179.

А.А. КАЗАК, Е.А. МЕЛЬНИКОВА, А.Л. ТОЛСТИК

Белорусский государственный университет, Минск

УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОТООРИЕНТАЦИИ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Представлен способ создания управляемых дифракционных элементов, формирующих световое поле с заданными свойствами, на основе ориентирования жидких кристаллов с помощью бензальдегидсодержащих фотополимеров.

A.A. KAZAK, E.A. MELNIKOVA, A.L. TOLSTIK

Belarusian state university, Minsk

CONTROLLED DIFFRACTION STRUCTURES BASED ON PHOTO-ORIENTATION OF LIQUID CRYSTALS

This paper presents a method of creating controlled diffractive elements forming the light field with desired properties based on the orientation of liquid crystals using photopolymers.

Фотоиндуцированная ориентация нематических жидких кристаллов (ЖК) на протяжении последних лет активно исследуется и используется в качестве одной из базовых технологий используемых при разработке дифракционных оптических элементов. В основе фотоориентации лежит фотохимическая запись анизотропии поверхности полимерного слоя под действием линейно-поляризованного активирующего излучения. Запись фотоанизотропии не предполагает механического контакта с поверхностью слоя, поэтому метод фотоориентации пригоден для создания в пределах одной поверхности участков с различной величиной анизотропии и различным направлением ее оптической оси.

В настоящей работе показано экспериментальное использование фотоориентирующей способности фотосшиваемых бензальдегидсодержащих полимеров, для создания управляемых дифракционных элементов (ДОЭ), формирующих световые поля с заданными свойствами [1, 2].

Для создания ДОЭ было предложено использовать специально синтезированные амплитудные маски-транспаранты для экспонирования слоя фотоориентанта поляризованным излучением и создания в нем необходимой анизотропии. Разработанные транспаранты на кварцевом

стекле могут представлять собой либо классические дифракционные решетки различных периодов, либо более сложные дифракционные структуры. Так, для создания элементов, позволяющих формировать сингулярные оптические пучки, профиль структуры представляет собой рассчитанную картину интерференции когерентной плоской волны с сингулярным пучком. Второй слой в создаваемых элементах равномерно засвечивается излучением, поляризованным ортогонально относительно излучения, засвечивающего первый слой. Итоговый ДОЭ представляет собой ячейку из двух подложек с нанесенными и проэкспонированными слоями фотополимера, ориентирующего необходимым образом молекулы нематического жидкого кристалла находящегося между ними.

При использовании в качестве подложек стекол с прозрачным токопроводящим слоем возможна реализация электрического управления созданным элементом, что представляет собой большой практический интерес. таких **управляемых** элементов проведен экспериментальный анализ зависимости дифракционной эффективности от приложенного электрического напряжения, который показал, что для сформированных В слое ЖК фазовых дифракционных структур, существуют оптимальные напряжения при которых дифракционная максимальна. Так. ДЛЯ элемента формирующего сингулярный пучок при напряжении 1,7 В дифракционная эффективность близка к 20%. Более высокие значения (до 27%), близкие к предельному для тонких фазовых голограмм, были получена при формировании гауссовых световых пучков.

На основе проведенных исследований разработан и создан ряд оптических элементов для управления пространственными и фазовыми характеристиками световых пучков, включая элементы, формирующие сингулярные и бесселевы световые пучки. Использование при этом различных порядков дифракции позволяет одновременно получать световые пучки с различными топологическими зарядами. ДОЭ такого типа могут представлять практический интерес при разработке разнообразных лазерно-оптических устройств.

- 1. Kazak A.A., Melnikova E.A., Tolstik A.L., Komar A.A. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2013. V.16. No.3., P.302-308.
- 2. Kazak A.A., Kazak L.A., Melnikova E.A., Tolstik A.L. Diffraction liquid crystals elements for formation vortex light fields // Journal of BSU. 2011. Is.1. №1.

В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ, А.В. МАКАРЕВИЧ, С.М. ШАНДАРОВ¹

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

 1 Tомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕШАННЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛЕ ВТО ПРОИЗВОЛЬНОГО СРЕЗА

Представлены результаты теоретической оптимизации процесса считывания смешанных пропускающих голограмм, сформированных в фоторефрактивном оптически активном пьезокристалле $\mathrm{Bi}_{17}\mathrm{TiO}_{20}$ произвольного среза.

V.V. SHEPELEVICH, A.V. MAKAREVICH, S.M. SHANDAROV¹

Mozyr state pedagogical university named after I.P. Shamyakin, Belarus

¹Tomsk state university of control systems and radioelectronics

OPTIMIZATION OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF THE MIXED HOLOGRAMS IN BTO CRYSTAL OF ARBITRARY CUT

The results of the theoretical optimization for the process of readout of the mixed transmission holograms formed in photorefractive optically active piezoelectric crystal $Bi_{12}TiO_{20}$ of an arbitrary cut are presented.

что для удовлетворительной Нелавно в [1] было показано, качественной количественной теоретической интерпретации получаемых экспериментальных при исследовании данных, ориентационной зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм, записанных в кристалле Ві₁₂ТіО₂₀ (ВТО) среза (110) толщиной 7.7 мм, необходимо учитывать одновременный вклад фазовой и амплитудной составляющих смешанной голографической решетки, формируемой в этом кристалле.

В настоящей работе представлены результаты оптимизации процесса считывания смешанных голограмм, записанных в кристалле ВТО, путем выбора оптимальных значений азимута линейной поляризации Ψ_0 и ориентационного считывающего пучка угла кристалла совокупность которых определяет максимальное (поляризационно и оптимизированное) дифракционной ориентационно значение

эффективности для сформированной в фиксированном срезе кристалла ВТО голограммы. При расчете были использованы параметры кристалла ВТО и условия считывания голограммы из [1], при амплитуде напряженности электрического поля пространственного заряда $E_G = 9 \cdot 10^4$ В/м. Результаты теоретического анализа представлены на рис. 1.

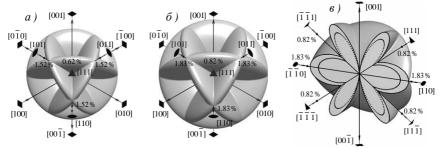


Рис. 1. Указательные поверхности максимальных значений дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в кристалле ВТО произвольного среза толщиной 7.7 мм: а) — в случае чисто фазовых голограмм; б) — в случае смешанных голограмм; в) — сечение указательной поверхности, показанной на рис. 1б, плоскостью $(1\overline{I}0)$ с обозначением пунктирной линией границы аналогичного сечения указательной поверхности, показанной на рис. 1а

Из рисунка видно, что в сравнении со случаем чисто фазовых (рис. 1а). vчет амплитудной составляющей смешанной голографической решетки (рис. 1б) приводит увеличению поляризационно ориентационно оптимизированных значений дифракционной эффективности голограмм при различной ориентации кристалла ВТО и не нарушает внутренней симметрии кристалла класса 23, о чем дополнительно свидетельствует рис. 1в.

Дополнительный анализ показывает, что совокупности значений Ψ_0 и θ , использованные для получения указательных поверхностей, изображенных на рис.1а и 1б, имеют существенные различия.

Работа выполнена при поддержке Государственной комплексной программы научных исследований «Электроника и фотоника», задание 2.2.18, а также Минобрнауки Российской Федерации в рамках задания № 2014/225 (проект № 2491).

Список литературы

1. Шепелевич В.В., Макаревич А.В., Шандаров С.М. Смешанные пропускающие голограммы в фоторефрактивном пьезокристалле Bi₁₂TiO₂₀ // Письма в ЖТФ. 2014. Т.40. №22. С.83–89.

О.Т. ВАЖИНСКИЙ^{1,2}, И.А. ПАРГАЧЁВ^{1,2}, Л.Я. СЕРЕБРЕННИКОВ^{1,2}, В.А. КРАКОВСКИЙ², С.М. ШАНДАРОВ^{1,2}, К.С. ТАРАСЕНКО^{1,2}

 1 Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники ^{2}OOO «Кристалл T», Томск

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА КОНТРАСТНОСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ЗАТВОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНОГО КРИСТАЛЛА КТЮРО4

В данной работе рассматриваются электрооптические затворы, включающие в себя элементы, изготовленные из высокоомного кристалла $KTiOPO_4$ (RKTP).

O.T. VAZHINSKY^{1,2}, I.A. PARGACHEV^{1,2}, L.Y. SEREBRENNIKOV^{1,2}, V.A. KRAKOVSKY², S.M. SHANDAROV¹, K.S. TARASENKO¹

¹Tomsk state university of control systems and radioelectronics ²Crystal T Ltd, Tomsk

TEMPERATURE DEPENDENCE OF CONTRAST RATIO OF ELECNRO-OPTICAL Q-SWITCH BASED ON HIGH RESISTANCE KTiPO₄ CRYSTAL

In this article the electrooptic q-switches based on high resistance $KTiOPO_4$ (RKTP) crystal are presented.

Для получения гигантских импульсов [1] в твердотельных лазерах используется модуляция добротности резонатора. Одним из наиболее распространенных устройств, используемых для модуляции добротности резонаторов, является электрооптический (ЭО) затвор. При работе лазера на ЭО затвор оказывается ряд воздействий, влияющих на его корректную работу. Одним из них является температурное воздействие. В данной работе рассматриваются ЭО затворы, включающие в себя элементы, изготовленные из высокоомного кристалла KTiOPO₄ (RKTP) [2].

Для компенсации фазового сдвига в элементах ЭО затвора применяется так называемая термокомпенсирующая схема [3]. Если элементы нагреты неравномерно, один из элементов затвора будет вносить больший фазовый сдвиг между быстрой и медленной волнами, чем второй. За основу измерения коэффициента контрастности принята

методика, описанная в [4]. Исследование зависимости контрастности от температуры ЭО затвора, осуществляется по схеме, представленной на рис. 1а. Термическая камера (4) устанавливается между скрещенными поляроидами (2 и 7). ЭО затвор помещается в термическую камеру и подключается к ИВН (6). Температура регистрируется термометром (3). На фотодетекторе (9) регистрируется интенсивность излучения, прошедшего анализатор (7), без управляющего напряжения на ЭО затворе (I_1). После чего на ЭО затвор подается полуволновое напряжение [3] и регистрируется интенсивность света (I_2). Контрастность (I_3) О затвора рассчитывается по формуле: I_3 0. Контрастность (I_3 1).

В термокомпенсирующей конструкции при изменении температуры возникают механические напряжения. Это приводит к деформации элементов. На рис. 16 представлен график изменения коэффициента контрастности при изменении температуры для ЭО затвора, собранного из двух кристаллических элементов размерами $6x6x10 \text{ мм}^3$. Корпус затвора выполнен из титана, в качестве клея использован эпоксидный состав с токопроводящими примесями. При изменении температуры затвора на 30 градусов значение контрастности не опускается ниже 20 дБ, что является достаточным для модуляции добротности твердотельных лазеров со средней мощностью до 2 кВт.

Научно-исследовательские работы проводились при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

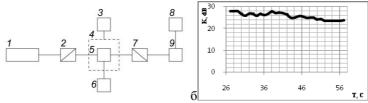


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - Nd:YAG лазер (λ = 1,064 мкм);

- 2, 7 поляризатор; 3 термометр (АКИП вольтметр универсальный В7-78/1);
- 4 термокамера; 5 ЭО затвор; 6 источник высокого напряжения (ИВН); 8 ПК;
- 9 фотодетектор SpiriconSP620U (а); зависимость коэффициента контрастности ЭО затвора от температуры (б)

- 1. Жаботинский М.Е. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. Москва, 1969.
- 2. Паргачёв И.А. и др. // Доклады ТУСУРа. 2012. Т.26. №2. Ч.2. С.90-93.
- 3. Паргачёв И.А. и др. // Доклады ТУСУРа. 2011. Т.24. №2. Ч.2. С.116-118.
- Элементы электрооптические. Методы измерения электрооптических параметров. ГОСТ Р 51036-97.

М.А. КУРОЧКИНА, Д.П. ЩЕРБИНИН, Е.А. КОНШИНА

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ, ДОПИРОВАНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ CdSe/ZnS

Исследование посвящено изучению спектров поглощения и люминесценции, а также низкочастотных спектров диэлектрических потерь суспензий на основе нематического жидкого кристалла и квантовых точек CdSe/ZnS с диаметром ядра 5,0 нм. Обнаружено значительное тушение люминесценции ЖК-1289 в зависимости от концентрации квантовых точек. Анализ диэлектрических спектров выявил существенное увеличение диэлектрических потерь в низкочастотной области. Результаты оценки показали увеличение концентрации свободных носителей заряда.

M.A. KUROCHKINA, D.P. SHCHERBININ, E.A. KONSHINA

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

THE OPTICAL PROPERTIES OF NEMATIC LIQUID CRYSTALS DOPED SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS CdSe/ZnS

The present research is devoted to the study of the absorption and luminescence spectra and the low-frequency dielectric loss of suspensions based on nematic liquid crystal and quantum dots CdSe/ZnS with a core diameter of 5.0 nm. A significant quenching of the NLC luminescence depending to the concentration of quantum dots was obtained. The analysis of dielectric spectra revealed a significant increase in dielectric losses in the low frequency region. The results showed an increase in the concentration of free charge carriers.

В настоящее время особый интерес вызывает допирование жидких кристаллов (ЖК) полупроводниковыми квантовыми точками (КТ), которые обладают уникальными оптическими свойствами [1]. Известно, что добавление КТ в жидкокристаллическую матрицу приводит не только к улучшению электрооптических свойств жидкого кристалла, но и влияет на его интенсивность люминесценции [2-4]. В этой работе приводятся

результаты исследований спектров поглощения и люминесценции и низкочастотные спектры диэлектрических потерь нематического жидкого кристалла, допированного полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/ZnS.

Исследования проводили с суспензиями нематического жидкого кристалла на основе цианобифенилов ЖК-1289 (НИОПИК, Москва) и гидрофобных полупроводниковых КТ CdSe/ZnS с диаметром ядра 5,0 нм (КТ630), покрытых оболочкой ТОРО. Суспензию готовили из порошкообразных КТ и ЖК в нематической фазе путем перемешивания с помощью ультразвука. Концентрацию квантовых точек варьировали от 0,05 до 0,3 wt.% для КТ630.

Установлено, что постепенное увеличение концентрации КТ630 в суспензии приводит к уменьшению интенсивности люминесценции жидкого кристалла. Такое изменение люминесценции ЖК при допировании его полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/ZnS может быть связано с переносом электрона от донора к акцептору [5], где в качестве донора могут выступать молекулы жидкого кристалла, а акцептором – служить квантовые точки.

При проведении исследований диэлектрических спектров, было выявлено существенное увеличение диэлектрических потерь в области до 10^3 Гц. Возрастание потерь в этой области спектра связано с увеличением удельной проводимости среды. Была произведена оценка концентрации свободных носителей заряда электрическим методом [6]. Анализ результатов показал увеличение концентрации свободных носителей, что так же может быть связано с эффективным разделением заряда.

- 1. Tamborra M., Striccoli M., Comparelli R., Curri M.L., Petrella A., Agostiano A. // Nanotechnology. 2004,15. P.240–244.
 - 2. Basu R., Iannacchione G.S. // Phys. Rev. 2009. V.80. P.010701(1-4).
 - 3. Kinkead B, Hegmann T. // J. of Mater. Chemistry. 2010. V.20. P.448-458.
 - 4. Kumar A., Biradar A.M. // Phys. Rev. E. 2011. V.83. P.041708 (1-8).
 - 5. Greenham N.C., Peng X., Alivisatos A.P. // Phys. Rev. B. 1996. V.54. No24.
- 6. James R., Stojmenovik G., Desimpel C., Vermael S., Fernández F.A., Day S.E., Neyts K. // Journal of display technology. 2006. V.2. No.3. P.237-246.

Ю.Д. АРАПОВ¹, С.Г. ГРЕЧИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана ¹Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ШИРИНУ СИНХРОНИЗМА В РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛАХ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

На основе результатов расчетов и экспериментальных измерений определено влияние термодеформационных процессов на величину температурной ширины синхронизма для нелинейно-оптических преобразователей частоты в различных одноосных и двухосных кристаллах. Показано, что для боратных кристаллов имеется значительное отличие температурных ширин при различных способах крепления нелинейного кристалла.

Yu.D. ARAPOV¹, S.G. GRECHIN

Bauman Moscow state technical university Zababakhin All-Russia research institute of technical physics, Snezhinsk

THE INFLUENCE OF THERMODEFORMATION PROCESSES ON PHASE-MATCHING TEMPERATURE BANDWIDTH INDIFFERENT NONLINEAR FREQUENCY CONVERSION CRYSTALS

On the basis of calculation and experimental results the influence of thermodeformation processes on temperature bandwidth for nonlinear frequency conversion in different uniaxial and biaxial crystals are determined. It is shown that for borate crystals there is large difference for temperature bandwidth with different methods of fixation.

Термодеформационные процессы (ТДП) в кристаллах обусловлены анизотропией коэффициентов линейного расширения. При нагревании кристалла с наиболее общим срезом происходит изменение его формы. При различных способах фиксации, которые используются на практике, это приводит к изменению направления фазового синхронизма относительно базовой плоскости. Угол поворота граней кристалла равен

$$\psi = -\hat{\alpha}_{xy} \cdot \Delta T = 0.5 \cdot (\alpha_{yy} - \alpha_{xx}) \cdot \sin 2 \varphi_0 \cdot \Delta T$$
(1)

где $\alpha_{\rm ii}$ – главные значения коэффициентов линейного расширения, φ_0 – угол среза кристалла.

Очевидно, что термодеформационные изменения отсутствуют для кристаллов, вырезанных вдоль главных осей.

Знак изменения направления фазового синхронизма определяется плоскостью фиксации – прижимом боковой или входной грани к основанию (без механических напряжений). При прижиме кристалла входной гранью изменение направления фазового синхронизма равно

$$\Delta \varphi^{(1)} = \psi. \tag{2}$$

Для случая прижима боковой грани $\Delta \varphi^{(2)} = \psi(1-2/n)$

где n — показатель преломления среды.

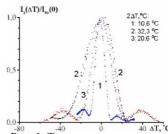


Рис. 1. Температурная зависимость кривой синхронизма в кристалле LBO

Влияние температурных изменений на температурную ширину синхронизма удобно определять с использованием производных для изменения направления фазового синхронизма температуры, от обусловленного изменением показателей преломления $(d\theta_n/dT)$ $ТД\Pi(d\theta_d/dT)$, также отношением этих производных $(\gamma=1-(d\theta_d/dT)/(d\theta_D/dT))$. Близость γ к 1,0 показывает, что ТДП не влияют на величину температурной ширины синхронизма. В слачае у≠1 имеется значительный вклад ТДП. При у<1 происходит согласованное изменение

ТДП, как и $d\theta_n/dT$, определяется на единицу длины кристалла. Расчеты проводились для 15 одноосных и двухосных кристаллов с использованием имеющихся данных о температурных производных для показателей преломления и коэффициентов линейного расширения из [1].

направление фазового синхронизма, при у>1 – противоположное. Влияние

Наибольшее влияние ТДП проявляется для боратных кристаллов – BBO, CLBO, LBO, для которых γ изменяется до 3,1. Для такого кристалла, как LiNbO₃, величина γ =1,02. Экспериментальное исследование проводилось для кристалла трибората лития (LBO) при генерации третьей гармоники излучения лазера на YAG:Nd³⁺.(1,064 мкм) [2]. На рис. 1 приведены температурные зависимости кривой синхронизма при фиксации кристалла прижимом: 1 – входной грани, 2 – верхней грани, 3 – боковой грани. Температурные ширины синхронизма для этого кристалла при прижимах боковой и входной граней отличаются в 3,1 раза.

- 1. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey. Springer, 2005.
- 2. Arapov Yu.D., Dyakov V.A., et.al. // Laser Physics Letters. 2014. V.11. N12. P.125402.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН

Оренбургский государственный университет

ПОГЛОЩЕНИЕ И СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА МОЛЕКУЛОЙ ВБЛИЗИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИПЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследованы частотные зависимости дипольных поляризуемостей металлических наночастиц и их кластеров в постоянном магнитном поле. Показано, что с изменением индукции магнитного поля трансформируются оптические спектры поглощения и рассеяния как самих наносистем, так и радиационные характеристики молекул, расположенных вблизи поверхности частиц.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN

Orenburg state university

ABSORPTION AND SPONTANEOUS EMISSION OF LIGHT BY MOLECULES NEAR METAL NANOPARTICLES IN EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Frequency dependences of a dipole polarizability of metal nanoparticles and those clusters are investigated in a constant magnetic field. It is shown that optical absorption and scattering spectra of nanosystems are transformed with the change of the magnetic field as well as radiation characteristics of molecules located near the surface.

Детально исследованы спектров поляризуемости изменения проводящей наночастицы и двухчастичного кластера в постоянных внешних магнитных полях различной величины индукции при различных взаимных ориентациях векторов поля и оси кластера (рис. 1 и 2, радиусы частиц кластера R_1 = 4, R_2 = 7 нм, его размер L= 20 нм, B=10 Тл, R_{MNP} = 7 нм). Установлено, что интенсивность поглощения света наночастицей на различных участках спектра может регулироваться посредством Спектры реальных магнитного поля [1]. и мнимых поляризуемостей наночастиц и кластеров существенно деформируются: происходит расщепление отдельных спектральных полос и появляются новые резонансы, «разбегающиеся» по частотам с увеличением индукции магнитного поля В. Для объяснения экспериментально наблюдаемых изменений в электронных спектрах поглощения, а также спонтанного и вынужденного свечения окрашенных растворов с металлическими

наночастицами, предложена простейшая модель трансформации вынужденных и спонтанных электродипольных переходов в органических молекулах, расположенных в окрестности отдельной металлической наночастицы [2, 3]. Скорость поглощения фотонов при наличии магнитного поля определяется выражением

$$w(\omega) = 2 \frac{\left| \mathbf{p} \left[\ddot{\mathbf{I}} + \ddot{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \ddot{\alpha}(\omega \mid \mathbf{B}) \right] \mathbf{E}_{0} \quad \omega \right|^{2}}{\hbar^{2}} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_{if})^{2} + \gamma^{2}}, (1)$$

где ${\bf E}_0$ ω - первичное поле (поле источника возбуждения), $\ddot{{\bf G}}({\bf r})$ - квазистатическая диадическая функция Грина точечного дипольного источника, γ - ширина Лоренцева контура полосы поглощения молекулы, $\ddot{\alpha}(\omega\,|\,{\bf B})$ - тензор поляризуемости наночастицы, зависящий от индукции магнитного поля ${\bf B}$. Эффект влияния металлической наночастицы на радиационные переходы в молекулах при наличии внешнего магнитного поля исследован на основе (1) и аналогичного выражения для скорости спонтанной эмиссии молекулы.

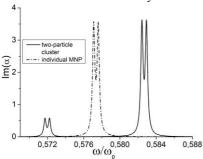


Рис. 1. Спектры мнимых частей поляризуемостей двухчастичного кластера и металлической частицы

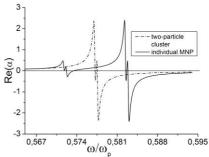


Рис. 2. Спектры реальных частей поляризуемостей двухчастичного кластера и металлической частицы

- 1. Кучеренко М.Г., Налбандян В.М. Модификация спектра дипольной динамической поляризуемости кластера из двух проводящих сферических наночастиц во внешнем магнитном поле // Вестник ОГУ. 2014. №1(162). С.118-126.
- 2. Rusinov A.P., Kucherenko M.G., Gladysheva Yu.A. Optical absorption change of organic dye molecules in the presence of metal nanoparticles // Rus.-Jap. Conf. «Chemical Physics of Molecules and Polyfunctional Materials»: Proc. Orenburg: OSU, 2014. P.20-22.
- 3. Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Кучеренко М.Г. Влияние наночастиц серебра на электронные переходы в молекулах красителей и генерационные характеристики жидкостных лазеров на их основе // Вестник ОГУ. 2014.№9(170). С.96-102.

А.И. ЛИВАШВИЛИ, М.И. ЯКУНИНА, Г.В. КОСТИНА, В.В. КРИШТОП, Т.Б. ЛИХОВОДОВА

Дальневосточный государственный университет путей сообщений, Хабаровск

ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Опираясь на систему балансных уравнений тепломассопереноса, изучается динамика концентрации наночастиц в наножидкости, находящейся под воздействием периодического светового поля. Рассмотрение проводится с учетом тепловой конвекции.

A.I. LIVASHVILI, M.I. YAKUNINA, G.V. KOSTINA, V.V. KRISHTOP, T.B. LIHOVODOVA

Far Eastern state transport university, Khabarovsk

THE DYNAMICS OF THE CONCENTRATION OF NANOPARTICLES IN LIQUID-PHASE MEDIUM UNDER THE INFLUENCE OF THE PERIODIC LIGHT FIELD

Based on a system of heat and mass balance equations, we study the dynamics of the concentration of nanoparticles in nanofluids under the influence of the periodic light field. The review shall be based on the thermal convection.

Целью этого сообщения является теоретическое исследование результатов действия термодиффузии, с учётом тепловой конвекции жидкости, на динамику концентрации наночастиц и, следовательно, на нелинейные оптические свойства среды. Распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды имеет вид

$$I \quad x = I_0 \quad 1 + q \sin kx \quad , \tag{1}$$

где $q=2\sqrt{I_s/I_{0s}}$, I_0 и I_s - интенсивности опорной и сигнальной плоских волн соответственно ($I_0\!>\!>\!I_s$), k – волновой вектор

пространственной решётки: $k=\frac{2\pi}{\lambda\sin\frac{\theta}{2}}$, а $\theta-$ угол между световыми

лучами.

В такой постановке задача решалась многими авторами (см. [1] и имеющуюся там библиографию). Однако влияние тепловой конвекции анализировалось лишь качественно [1, 2]. Мы исходим из системы балансных уравнений, описывающих изучаемые процессы. В нашем подходе тепловая конвекция учитывается слагаемым, содержащем конвективную скорость, которую мы принимаем постоянной и равной $v_z = \beta g T_m \pi h^2 / 16 \mu$ [2], где β – коэффициент объемного расширения, T_m — максимальная температура среды, h — период концентрационной решётки и μ — вязкость жидкости. Рассматриваемая система имеет точное решение (в линейном приближении по концентрации: $c(1-c) \approx c_0$, где c_0 – начальная концентрация), которое в установившемся режиме можно представить в виде

$$c \ x = c_0 \left[1 + \frac{\beta S_T}{4ka \left(1 + \frac{v_z^2}{2k^2 a^2} \right)} \cos kx + \phi \right], \tag{2}$$

где $\varphi = arctgka/v_z$, $S_T = D_T/D$ —коэффициент Соре.

Из полученного результата можно сделать вывод: что увеличение интенсивности облучения приводит к росту \mathcal{V}_z (через температуру), а это, в свою очередь, влияет на вклад конвекции в амплитуду $\mathcal{C}(X)$ и, следовательно, на величину нелинейной части показателя преломления среды.

- 1. Thermal nonequilibrium phenomena in fluid mixtures /eds. W. Kohler, S. Wiegand. Lecture Note in Physics. V.584. Berlin: Springer, 2002.
- 2. Karimzadeh R. Spatial self-phase modulation of a laser beam propagating through liquids with self-induced natural convection flow // J. Opt. 2012 V.14. P.095701.

Х. БАЗЗАЛ, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖДУИМПУЛЬСНОГО ИНТЕРВАЛА НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ И ФРАКТАЛОВ ОКСИДОВ ОЛОВА ПРИ НАПЫЛЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ВОЗДУХЕ

На примере синтеза тонкопленочных металлических покрытий показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок оксидов олова на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения (торможение осаждаемых частиц, внедрение атмосферных газов в объем пленки).

KHODER BAZZAL, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN Belarusian state university, Minsk

THE EFFECT OF INTERPULSE TIME ON THE FORMATION OF TIN OXIDE NANOPARTICLES AND FRACTALS UPON SPUTTERING OF THIN FILMS ONTO GLASS SURFACE BY DOUBLE LASER PULSES IN THE AIR

Using synthesis of thin-film metallic coatings as an example, it is demonstrated that the use of high-power double laser pulses enables one to realize laser sputtering of thin tin-oxide films onto glass directly in the air and to reduce negative effects exerted by the ambient (retardation of the sputtered particles, ingress of atmospheric gasses into the film) on the sputtering process.

Оксид олова (IV) — полупроводник, широко используемый для изготовления химических сенсоров. Для изготовления приборов наиболее часто используется моноимпульсный лазерный синтез.

Для проведения наших исследований использован лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 с двухимпульсным неодимовым лазером, с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM).

Динамика напыления на поверхность стекла наночастиц оксидов олова исследована при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных

импульсов на мишень из олова, установленную под углом 45 градусов к падающему излучению и на расстоянии 3 мм от подложки. Энергия каждого импульса излучения ≈ 48 мДж. Исследования проведены при временных интервалах между импульсами от 0 до 15 мкс. Исследования процессов напыления показали, что при интервалах от 0 до 6 мкс олово распыляется, но напыления пленки практически не наблюдается. С увеличением интервалах от 7 до 15 мкс. При дальнейшем увеличении интервала качество пленки существенно ухудшается. Проведенные параллельно спектральные исследования зарядового состава компонент приповерхностной плазмы показали, что в этом интервале интенсивность ионной линии олова Sn II (328,35 нм) существенно увеличивается, что способствует ускорению процессов образования оксидов (см. рис. 1а).

Изображения поверхности стекла с нанесенными пленками, увеличенные с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4 в 300 раз, приведены на рис. 1б и 1в. На рис. 1б приведена свеженапыленная поверхность, которая имеет довольно разрыхленную структуру. После механической очистки поверхности пластмассовым лезвием структура, а также цвет поверхности существенно изменились. Изменение цвета поверхности с коричневато-желтого на белый свидетельствует о том, что первичная, более прочная пленка образована четырехвалентным оксидом олова типа SnO₂. Верхняя, более рыхлая, поверхность двухвалентным оксидом олова SnO.

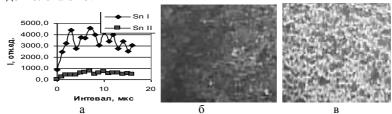


Рис. 1. Интенсивность атомной Sn I (317,502 нм) и ионной Sn II (328,35 нм) линий от интервала между импульсами и изображение поверхности стекла после напыления оксидов олова сдвоенными лазерными импульсами (а): 300 импульсов (б) и 300 импульсов после механической очистки (в)

На примере синтеза тонкопленочных металлических покрытий показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения.

Д.С. УМРЕЙКО¹, Е.В. ВИЛЕЙШИКОВА, А.И. КОМЯК, А.П. ЗАЖОГИН, С.Д. УМРЕЙКО¹

Белорусский государственный университет, Минск ¹НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ ОКСИДОВ УРАНА И АЛЮМИНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Показано, что при нагревании подложки с осажденным пероксидом урана при температуре 400-450 0 C можно получить оксид урана типа β - UO_3 , а температурах 500-600 0 C - различные формы U_3O_8 . Для получения развитой поверхности алюминия активированной оксидами урана использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 со сдвоенными лазерными импульсами.

D.S. UMREIKO¹, E.V. VILEISHIKOVA, A.I. KOMYAK, A.P. ZAJOGIN, S.D. UMREIKO¹

Belarusian state university, Minsk
¹Sevchenko research institute of applied physical problems, Minsk, Belarus

INVESTIGATION INTO THE FORMATION OF URANIUM OXIDE AND ALUMINUM NANOCLUSTERS WITH LASER MODIFICATION OF THE OXIDIZED ALUMINUM SURFACE

It has been shown that when the substrate with the deposited uranium peroxide is heated to the temperature 400-450 0 C, one can produce the β -UO $_{3}$ type uranium oxide, and at the temperatures 500-600 0 C – different forms of U $_{3}$ O $_{8}$. The developed surface of aluminum activated by uranium oxides was produced using a LSS-1 multichannel atomic-emission spectrometer with double laser pulses.

Известно, что внедрение лучших по характеристикам катализаторов на порядок, а то и два эффективнее других технических усовершенствований. Так в работе [1] показано, что с повышением температуры термообработки до $1000~^{0}\mathrm{C}$ активный компонент катализатора $U/\mathrm{Al}_{2}\mathrm{O}_{3}$ переходит в нанодисперсное состояние, что приводит к значительному увеличению его каталитической активности в реакциях окисления. Одним из перспективных способов является получения урановых катализаторов в виде пленок оксидов урана на твердом носителе.

Целью настоящей работы являлось изучение процессов получения оксидов урана переменной валентности на поверхности оксидированного алюминия. При осаждении продуктов фотоконденсации ацетона и урана с помощью перекиси водорода на пористой поверхности оксидированного алюминия образуются прочно связанные с подложкой нанокластеры преимущественно шестивалентного пероксида урана. Для получения высокореакционных оксидов урана на поверхности оксида алюминия использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Плавление вещества и возбуждение плазмы в спектрометре осуществляется излучением двухимпульсного лазера на АИГ+Nd³⁺ (модель LS2131 DM). Длительность импульсов ≈ 15 нс. Фокусное расстояние объектива 104 мм. Для уменьшения плотности энергии на мишени она располагалась на расстоянии 109 мм. При обработке поверхности использовался временной интервал между сдвоенными импульсами мкс. Изображения поверхности оксидированного алюминия с нанесенными пленками, увеличенные с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4, приведены на рис. 1 (увеличение в 300 раз). Для полуколичественной оценки содержания урана в порах использовался вышеприведенный спектрометр.

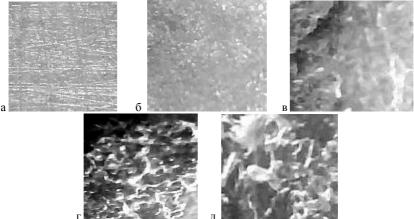


Рис. 1. Изображение поверхности оксидированного алюминия: с осажденным пероксидом урана (а); тоже, прогретое при температуре $420~^{0}$ C (б), тоже, что и (а), после обработки лазером по площади (энергия 2 импульсов по 24~мДж (в); 10~импульсов по 24~мДж (д))

Список литературы
1. Исмагилов З.Р., Кунцевич С.В., Кузнецов В.В. и др. // Кинет.катал. 2007. Т.48. №4. С.544.

Д.А. КИСЛОВ

Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК ГРЕТПЕЛЯ

В работе показано, что добавление наночастиц серебра в конструкцию солнечных ячеек на основе сенсибилизированного красителем наноструктурированного диоксида титана приводит к увеличению их КПД. Кроме этого обнаружено существенное влияние наночастиц серебра на емкостные и транспортные свойства солнечных ячеек Гретцеля.

D.A. KISLOV

Orenburg state university

EFFECT OF PLASMONIC SILVER NANOPARTICLES ON THE PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF GRAETZEL SOLAR CELLS

It is shown that the addition of silver nanoparticles in the construction of solar cells leads to significant increase in their efficiency. Apart from that found a significant effect of silver nanoparticles on the capacitive and transport properties Graetzel solar cells.

Работы над улучшением характеристик ячейки Гретцеля постоянно ведутся. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является использование в конструкции солнечной батареи специально сформированных кластеров из наночастиц обладающими плазмонными свойствами [1, 2, 3]. В данной работе проведено исследование влияния серебряных наночастиц с плазмонным резонансом на механизмы работы электрохимических фотовольтаических элементов (солнечных батарей) на основе наноструктурированного диоксида титана (рис. 1).

На рис. 2 представлены вольт-амперные кривые исследуемых образцов. Видно, что образцы, в конструкцию которых внедрены наночастицы серебра генерируют больший фототок. Причем ток тем больше чем больше концентрация наносеребра присутствует в ячейке.

Для исследования емкостных и транспортных свойств полученных образцов фотовольтаических ячеек была проведена серия экспериментов по наблюдению отклика ячейки Гретцеля на дополнительный единичный импульс лазера при различной интенсивности света смещения.

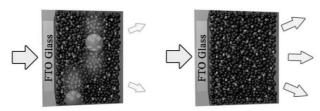


Рис. 1. Демонстрация основной идеи работы. Молекулы красителя в ячейке Гретцеля, попавшие в область локально усиленного ближнего поля металлической наночастицы, генерируют больше свободных носителей заряда

По полученным данным была рассчитана электрохимическая емкость образцов и коэффициент диффузии фотоэлектронов инжектируемых в пленку диоксида титана.

Показано, что наличие в конструкции ячеек наночастиц увеличивает серебра электрохимическую емкость образцов (для образца C_{Ag} =53,7 мг/л в 1,3 раза по сравнению с образцом без наночастиц). Кроме этого получено, что с увеличением концентрации наночастиц серебра коэффициент диффузии фотоэлектронов в слое ТіО2 увеличивается (для образца с C_{Ag} =53,7 мг/л в 1,22

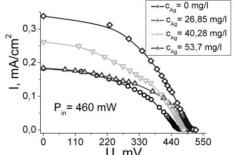


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ячеек Гретцеля с добавлением в структуру разной концентрации наночастиц серебра

раза по сравнению с образцом без наночастиц).

- 1. Кислов Д.А., Пономаренко Д.В. Влияние наночастиц серебра на основные параметры фотовольтаической ячейки Гретцеля // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург: ОГУ, 2014. С.1377-1384.
- 2. Kislov D.A., Isupov A.Yu. Dye-sensitized solar cell containing plasmonic silver nanoparticles // Russian-Japanese Conference «Chemical physics of molecules and polyfunctional materials»: Proceedings. Orenburg: OSU. 2014. P.10-12.
- 3. Nahm C., et. al. The effects of 100 nm-diameter Au nanoparticles on dye-sensitized solar cells // Appl. Phys. Lett. 2011. V.99. P.253107.

С.В. ИЗМОДЕНОВА, Д.А. КИСЛОВ, М.Г. КУЧЕРЕНКО Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ ВНУТРИ ОБРАТНЫХ МИЦЕЛЛ

Экспериментально исследовано влияние металлических наночастиц на скорость межмолекулярной индуктивно-резонансной передачи энергии электронного возбуждения в системе обратных мицелл. Обнаружено увеличение эффективности переноса энергии в такой системе по сравнению с образцами, не содержащими наночастиц металла. Предложена математическая модель процесса, качественно согласующаяся с результатами проведенного эксперимента.

S.V. IZMODENOVA, D.A. KISLOV, M.G. KUCHERENKO Orenburg state university

INFLUENCE SILVER NANOPARTICLES OF THE NONRADIATIVE ELECTRON-EXCITATION ENERGY TRANSFER BETWEEN MOLECULES INSIDE REVERSE MICELLES

The effect of metal nanoparticles on the rate of intermolecular inductive-resonance transfer of electron-excitation energy has been experimentally studied in a system of reverse micelles. The efficiency of the energy transfer has been found to be increased in this system as compared with samples free of metal nanoparticles. A mathematical model that qualitatively agrees with experimental data has been proposed for the process.

В качестве объекта исследования была выбрана система обратных мицелл (ОМ) с внедрёнными молекулами донора — акридиновый оранжевый (АО) и акцептора — бенгальский розовый (БР) и наночастицами серебра. Возбуждение молекул донора производилось светом на длине волны $\lambda_{\rm exc}=430$ нм.

Наночастицы серебра синтезировались непосредственно внутри обратных мицелл методом химического восстановления [1].

Теоретические расчёты производились по формулам, содержащим помимо геометрических параметров лишь экспериментально измеряемые спектральные характеристики [2].

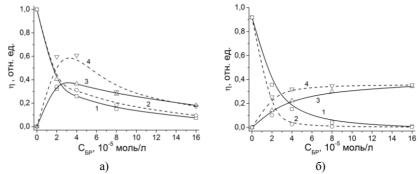


Рис. 1. Экспериментальные (а) и теоретические (б) концентрационные зависимости квантовых выходов люминесценции отдельных компонент бинарной донор-акцепторной системы АО-БР в растворе ОМ с наночастицами и без них (1 - квантовый выход донорной компоненты без наночастиц; 2 - квантовый выход донорной компоненты с наночастицами; 3 - квантовый выход акцепторной компоненты без наночастиц; 4 - квантовый выход акцепторной компоненты с наночастицами)

На рис. 1а и 16 представлены концентрационные (по акцептору) зависимости квантового выхода флуоресценции отдельных компонент донор-акцепторной пары, с учетом влияния наночастиц серебра на процесс межмолекулярного индуктивно-резонансного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения и без этого учета. Можно видеть хорошее качественное согласие характеров этих зависимостей, а также количественное совпадение параметров эффективности переноса энергии между экспериментальными и теоретическими данными для системы АО-БР в обратных мицеллах ПАВ с наночастицами.

Таким образом, одним из возможных объяснений экспериментально наблюдаемого увеличения эффективности переноса энергии в обратных мицеллах ПАВ, содержащих наночастицы металла может являться плазмонный рефлектор электромагнитного поля, в качестве которого выступает металлическая наночастица. Это обстоятельство может способствовать увеличению скорости безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения между молекулами люминофоров в обратных мицеллах ПАВ.

- 1. Pal A., Shah S., Devi S. // Coll. and Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects. 2007. V.302. P.483.
 - 2. Izmodenova S.V., Kislov D.A., Kucherenko M.G. // Colloid Journal. 2014. V.76. No.6. P.683.

С.Д. ПРОХОРОВ, И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ СИЛЬНОРАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ

В данной работе исследовалась коллоидная стабильность растворов полупроводниковых квантовых точек с различными лигандами. Показано, что при низких концентрациях флуоресценция таких растворов деградирует со временем. Исследовано влияние концентрации свободных лигандов в растворе квантовых точек низкой концентрации на стабильность их флуоресценции.

S.D. PROKHOROV, I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

RESEARCH OF FLUORESCENCE OF STRONGLY DILUTED SOLUTIONS OF CADMIUM SELENIDE BASED SEMICONDUCTOR QUANTUM DOTS

In this study we investigated the colloidal stability of solutions of semiconductor quantum dots with different ligands. It is shown that at low concentrations the fluorescence of these solutions degrades with time. The influence of the concentration of free ligands in the solution of low concentration of quantum dots on the stability of their fluorescence has been researched.

В настоящее время одной из областей практического применения флуоресцентного анализа являются биомедицинские исследования. Уже сегодня разрабатываются коммерческие приборы, предназначенные для лабораторной диагностики различных заболеваний, в том числе онкологических. Однако существующие на сегодняшний день технологические решения для этой задачи требуют дальнейшего совершенствования. В основном это связано с рядом недостатков используемых флуоресцентных меток, в качестве которых традиционно используют молекулы органических красителей.

Одним из путей решения этой задачи может быть создание прибора, в котором в качестве флуоресцентных меток будут использоваться полупроводниковые коллоидные квантовые точки (КТ).

На данный момент готовых решений этой задачи не существует, поскольку идея применения КТ в данной области появилась относительно недавно.

В данной работе была исследована стабильность флуоресценции растворов с различной концентрацией КТ. При этом исследовались КТ с различными лигандами. Показано, что в сильноразбавленных растворах происходит деградация флуоресценции со временем (рис. 1).

Исследовано влияние концентрации свободных лигандов в растворе КТ на стабильность флуоресценции.

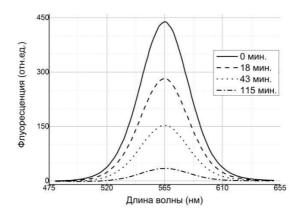


Рис. 1. Деградация флуоресценции раствора квантовых точек низкой концентрации

- 1. Noh M, Kim T, Lee H, Kim C.K., Joo S.W., Lee K. // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2010. V.359. P.39-44.
- 2. Resch-Genger U, Grabolle M, Cavaliere-Jaricot S, Nitschke R, Nann T. // Nat. Methods. 2008. V.5(9). P.763-775.

Х. БАЗЗАЛ, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ЦИНКА И МЕДИ ИЗ ЛАТУНИ НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА

Изучены возможности получения пленок оксидов цинка и меди, с достаточно хорошими механическими характеристиками, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами мишени из латуни, установленной на расстояниях 3 мм под углом 45^0 к подложке в воздушной атмосфере.

KHODER BAZZAL, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN Belarusian state university, Minsk

SPECTRAL STUDIES OF THIN-FILM DEPOSITION OF ZINC AND COPPER OXIDES FROM BRASS ONTO THE GLASS SURFACE BY DOUBLE LASER PULSES AT ATMOSPHERIC PRESSURE

The possibilities to form the films of zinc and copper oxides featuring sufficiently good mechanical characteristics have been examined by ablation of a brass target, positioned at a distance of 3 mm and at an angle of 45° to the substrate, in the air with the use of double laser pulses.

Оксид цинка является широкозонным полупроводником и имеет рекордную среди бинарных полупроводников энергию связи экситона — 60 мэВ. Эти достоинства являются предпосылкой для создания устройств, эффективно работающих при высоких температурах, в открытом космосе и в ядерных реакторах.

Для проведения наших исследований использован лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 с двухимпульсным неодимовым лазером, с регулируемыми энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM).

Динамика напыления на поверхность стекла наночастиц оксидов цинка исследована при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на мишень из латуни, установленную под углом 45

градусов к падающему излучению и на расстоянии 3 мм от подложки. Энергия каждого импульса излучения ≈ 35 мДж, а временной интервал между импульсами от 0 до 20 мкс.

Исследования процессов напыления показали, что при интервалах от 0 до 6 мкс цинк распыляется, но напыления пленки практически не наблюдается. С увеличением интервала наблюдается заметный рост пленки, особенно заметный в интервалах от 8 до 15 мкс. При дальнейшем увеличении интервала качество пленки существенно ухудшается. Проведенные параллельно спектральные исследования зарядового состава компонент приповерхностной плазмы показали, что в этом интервале интенсивность ионной линии цинка Zn II (492,404 нм) существенно увеличивается, что способствует ускорению процессов образования оксидов цинка (см. рис. 1а).

Изображения поверхности стекла с нанесенными пленками, увеличенные с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4 в 300 раз, приведены на рис. 16 и 1в.

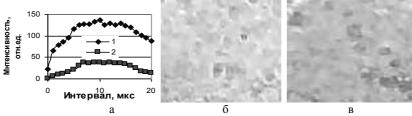


Рис. 1. Интенсивность атомной Zn I (468,014 нм) и ионной Zn II (492,404 нм) линий (1 и 2 соответственно) (а) и изображение поверхности стекла после напыления цинка и меди сдвоенными лазерными импульсами: 300 импульсов (б) и 1000 импульсов на полированную поверхности (в)

Таким образом, воздействие на мишень второго лазерного импульса с временным сдвигом 8-15 мкс относительно первого, приводит к существенному увеличению поступления вещества в плазму и на поверхность стекла.

На примере синтеза тонкопленочных металлических покрытий показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения (торможение осаждаемых частиц, внедрение атмосферных газов в объем пленки).

Д.С. УМРЕЙКО¹, Е.В. ВИЛЕЙШИКОВА, А.А. ЗАЖОГИН, А.И. КОМЯК, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск ¹НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Минск, Беларусь

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОТОХИМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НАНОКОМПЛЕКСОВ УРАНА ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ В АЦЕТОНЕ

В системах $UO_2(CIO_4)_2 \cdot 5H_2O$ в ацетоне с добавлением катионов Mg, Na в ацетоне при облучении излучением (область 420-440 нм). происходит фотополимеризация ацетона, а катализатором процесса являются возбужденные комплексы уранила. В спектрах образцов растворов $UO_2(CIO_4)_2 \cdot 5H_2O$ в ацетоне с добавлением катионов Mg, K в воде наблюдается появление полос, принадлежащих комплексам трех- четырех- и пятивалентного урана.

D.S. UMREIKO¹, E.V. VILEISHIKOVA, A.A. ZAJOGIN, A.I. KOMYAK, A.P. ZAJOGIN

Belarusian state university, Minsk

Sevchenko research institute of applied physical problems, Minsk, Belarus

SPECTRAL STUDIES OF THE PHOTOCHEMICAL FORMATION PROCESSES OF VARIABLE VALENCE URANIUM NANOCOMPEXES IN ACETONE

The patterns of these processes have been established. In systems of $UO_2(CIO_4)_2 \cdot 5H_2O$ in acetone with the addition of Mg, Na cations such illumination leads (region 420-440 nm) to photopolymerization of acetone, the excited uranyl complexes being the process catalysts. The spectra of $UO_2(CIO_4)_2 \cdot 5H_2O$ solutions in acetone with the addition of Mg, K cations into water reveal the bands attributed to the complexes of three-, tetra-, and pentavalent uranium.

В нашей работе [1] было показано, что модельные жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), содержащие кетонные растворители (ацетон) и уранил могут, при оптическом облучении в области 400-420 нм, переведены в желеобразные, содержащие продукты поликонденсации кетонов и уран в различных валентных состояниях. В качестве объектов исследования нами были выбраны растворы перхлората уранила в смеси с

перхлоратными растворами калия, магния в воде и натрия, магния в Для исследования влияния физико-химических растворов на процессы фотохимического образования комплексов урана нами были использованы спектры электронного поглощения. Регистрация спектров электронного поглошения области 335-1000 осуществлялась ПВА автоматическом спектрофотометре (производитель СП «Солар ТИИ»).

Совместные результаты для сравнения для всех исследованных систем представлены на рис. 1а. Видно, что области минимального поглощения уранила (362 нм) оптическая плотность растворов как в ацетоне, так и с добавкой ацетоновых растворов Mg и Na уже при 90-120 мин облучения выходит на плато при D=5, а добавки водных растворов K и Mg - при D чуть более 1 для K и чуть менее 2 для Mg. Наблюдаемое различие может свидетельствовать об изменении состава первой координационной сферы иона уранила при добавлении воды или ацетона. Об различии видов образующихся комплексов четырех- и пятивалентного урана и их координационного окружения свидетельствуют спектры, приведенные на рис. 1б. Видно, что добавление K и Mg в воде смещает их в длинноволновую сторону по сравнению с Na и Mg в ацетоне (рис. 1а), а около 900 нм обнаруживается поглощение трехвалентного урана.

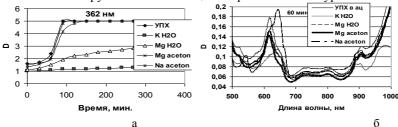


Рис. 1. Зависимость изменения оптической плотности на длине волны 362 нм от времени облучения (а); спектры поглощения комплексов урана переменной валентности в различных растворах (б)

Отметим, что введение дополнительно к основному электролиту небольших содержаний электролитов иной природы, по-видимому, позволит влиять на изменение фотохимических свойств системы более тонким смещением равновесия в нужном направлении, что может отразиться на расширении возможностей утилизации ЖРОО.

Список литературы

1. Зажогин А.П., Зажогин А.А. и др. // Журн. прикл. спектр. 2007. Т.74. №5. С.565-568.

Д.С. ОВЕЧЕНКО, А.П. БОЙЧЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

Исследована зависимость электрохемилюминесценции (ЭХЛ) алюминиевого анода от концентрации раствора гидроксида калия (КОН) в диапазоне 0,025–0,2 Mol/l. Показано уменьшение ЭХЛ с концентрации КОН ~0,125 Mol/l за счет интенсификации процесса растворения оксидной пленки металла.

D.S. OVECHENKO, A.P. BOYCHENKO

Kuban state university, Krasnodar

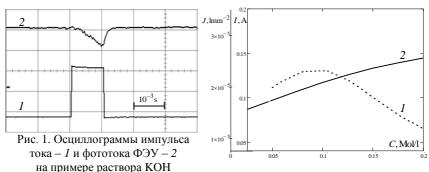
FEATURES ELECTROCHEMILUMINESCENCE AT RECEPTION NANOPOROUS OXIDE ALUMINUM IN ALKALINE ENVIRONMENT

The dependence electrochemiluminescence (ECL) aluminum anode from concentration of a solution hydroxide potassium (KOH) in a range 0.025-0.2 Mol/l is investigated. The reduction ECL from concentration KOH ~0.125 Mol/l for the account intensity of process dissolution oxide film of metal is shown.

Электролитическое получение нанопористого оксида алюминия (Al_2O_3) в щелочных средах в отличие от кислых, носит дискуссионный характер [1], в частности из-за способности щелочей растворять оксидную пленку металла, сформированную как до, так и после его анодирования. Однако специальных исследований в этом направлении не проводилось, как и рассмотрение возможности генерации электрохемилюминесценции (ЭХЛ) при анодировании алюминия в растворах щелочей. Настоящая работа является продолжением предыдущей [2] и ставит задачу обнаружения и исследования ЭХЛ при импульсном анодировании Al в растворе гидроксида калия (КОН) концентрацией C от 0,025 до 0,2 Mol/l.

Регистрация интенсивности ЭХЛ J осуществлялась на ранее описанной установке [2] вместе с протекающими через раствор импульсами тока I. Последние создавались приложенными к электрохимической ячейке импульсами напряжения длительностью 10^{-3} s и амплитудой 60~V от генератора импульсов $\Gamma 5$ -63. При этом скорость

непрерывно прокачиваемого раствора КОН составляла $\sim 10^{-4}$ I/s, а напряжение на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ-29) — 1100 V, что обеспечивало его анодную светочувствительность до 100 A/lm. Электрические сигналы регистрировались на виртуальном двухканальном осциллографе PCS500, пример осциллограмм которых приведен на рис. 1. По амплитудным значениям регистрируемых параметров строились зависимости J(C) и I(C), представленные на рис. 2.



концентрацией 0,125 МоІ/І

Рис. 2. Зависимости J(C) – I и I(C) – 2

Первой выявленной особенностью ЭХЛ, начиная с C КОН 0,05 Mol/l, оказалось ее возникновение только после предварительного действия на электрохимическую ячейку ~3000 импульсов и более, что, очевидно, связано с образованием прочной оксидной пленки на металле, не успевающей растворятся в щелочной среде. По мере увеличения C КОН растворение Al_2O_3 интенсифицируется, чем объясняется нарушение барьерных свойств металла и, как следствие, уменьшение J, что отражает кривая I рис. 2. Однако, по кривой 2 данного рисунка видно, что во всем диапазоне концентраций щелочи протекающий при этом ток квазилинейно возрастает. Вторая особенность — это зависимость генерации ЭХЛ от предыстории используемого алюминия, наличия на нем оксидной пленки, возникшей тем или иным путем. Кроме того, как видно из рис. 1, возникновение ЭХЛ имеет запаздывание относительно переднего фронта импульса тока на $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ s, наблюдаемое для всех C.

- 1. Филяк М.М., Каныгина О.Н. Особенности формирования анодного оксида алюминия в щелочных электролитах // Вестник ОГУ. 2013. №1(150). С.154-159.
- 2. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. Электрохемилюминесценция алюминиевого анода в растворах щавелевой и лимонной кислот // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды XVII Междунар. конф. Ульяновск: УлГУ, 2014. С.165-166.

М.А. ЗВАЙГЗНЕ, И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ, П.С. САМОХВАЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЛИГАНДОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СЕЛЕНИДА КАДМИЯ В МАТРИЦЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

В работе исследовались люминесцентные свойства квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS/CdS/ZnS, внедренных в матрицу полиметилметакрилата (ПММА). Показано, что спектральные характеристики, величина времени жизни в возбужденном состоянии и значение квантового выхода люминесценции зависит от типа используемых лигандов. Установлено, что использование в качестве лигандов алифатических молекул более предпочтительно, чем ароматических. Полученные результаты могут быть использованы для создания эффективных конверторов излучения на основе КТ.

M.A. ZVAIGZNE, I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV, P.S. SAMOKHVALOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

INFLUENCE OF SURFACE LIGANDS ON LUMINESCENT PROPERTIES OF CADMIUM SELENIDE QUANTUM DOTS IN A MATRIX OF POLYMETHYLMETHACRYLATE

Here, we study luminescent properties of CdSe/ZnS/CdS/ZnS quantum dots (QD) with different surface ligands, embedded in a matrix of polymethylmethacrylate (PMMA). The dependence of the photoluminescence (PL) spectra, absorbance spectra, quantum yield and PL lifetimes of the ligand's type have been shown. Furthermore, the preference of using as ligand molecules aliphatic over aromatic has been found. Results may be used for effective light energy conversion in devices based on QDs.

В настоящее время коллоидные полупроводниковые квантовые точки (КТ) активно используются в области фотоники, что обусловлено их уникальными фотофизическими характеристиками. КТ обладают узким спектром люминесценции, широким спектром поглощения, зависимостью энергетического спектра от размера, хорошей фотостабильностью и высоким квантовым выходом (QY). Одним из направлений практического использования КТ, внедренных в инертные полимерные матрицы, которое

в настоящее время активно развивается, является изготовление конвертеров излучения для создания белых светодиодов. Несмотря на большое количество исследований в данной области, актуальным остается вопрос о влиянии поверхностных лигандов КТ на люминесцентные свойства в полимерных матрицах.

В рамках настоящей работы были исследованы люминесцентные свойства КТ CdSe/ZnS/CdS/ZnS, с тремя различными типами лигандов: триоктилфосфиноксидом, октантиолом и тиофенолом. Для создания композитов КТ/полимер в виде тонких пленок использовался метод нанесения раствора на вращающуюся подложку. Характерное массовое соотношение КТ/полимер в созданных композитах составляло 1:30. Для характеризации пространственного распределения КТ в созданных композитах были использованы конфокальная и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рис. 1, которые показали отсутствие кластеризации КТ.

Исследование люминесцентных свойств показало, что положение первого пика экситонного поглощения в отличие от положения спектров люминесценции не зависит от типа лигандов. Установлено, что величина времени жизни и значение квантового выхода люминесценции возрастают в ряду: тиофенол, триоктилфосфиноксид, октантиол. Полученные результаты могут быть использованы для создания эффективных конверторов излучения на основе КТ.

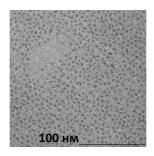


Рис. 1. Изображение КТ в матрице ПММА, полученное на ПЭМ

- 1. Anikeeva P.O., Halpert J.E., Bawendi M.G., Bulovic V. // NanoLett. 2009. V.9. P.2532.
- 2. Lee Ki.-H., Lee J.-H., Song W.-S., Ko H., Lee C., Lee J.-H., Yang H. # Am. Chem. Soc. 2013. V.7(8). P.7295–7302.
- 3. Jang H.S., Yang H., Kim S.W., Han J.Y., Lee S.-G., Jeon D.Y. // Adv. Mater. 2008. V.20. P.2696.

М.А. ГОРЯЕВ, А.П. СМИРНОВ

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АДСОРБИРОВАННОГО КРАСИТЕЛЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ

Исследована люминесценция красителя на поверхности стеарате серебра. Обсуждается спектральная сенсибилизация композиционных материалов красителями, адсорбированными как на фотопроводнике, так и на диэлектрике.

M.A. GORYAEV, A.P. SMIRNOV

Herzen Russian state pedagogical university, Saint-Petersburg

LUMINESCENCE OF ADSORBED DYE AND SPECTRAL SENSITIZATION

The luminescence of dye on the silver stearate surface is investigated. The spectral sensitization of composed materials by dyes adsorbed as on photoconductor as on dielectrics is discussed.

Регистрирующие среды являются многокомпонентными системами, и в процессе спектральной сенсибилизации могут принимать участие красители, адсорбированные как на фоточувствительных полупроводниках, так и на диэлектриках [1, 2]. В работе исследованы спектрально-люминесцентные характеристики красителя, адсорбированного на стеарате серебра, и рассмотрен вклад этих красителей в совокупный процесс спектральной сенсибилизации композиций на основе галогенидов и стеарата серебра.

На диэлектриках квантовый выход люминесценции адсорбированных красителей составляет десятки процентов, а на хорошо сенсибилизируемых фоточувствительных полупроводниках свечение отсутствует вследствие эффективной передачи энергии фотовозбуждения адсорбенту [1, 3]. Методом разбавления белым стандартом [4] определены истинные характеристики люминесценции родамина В, адсорбированного на поверхности стеарата серебра. Квантовый выход его люминесценции составил 0,4, что сравнимо с этим параметром для типичного диэлектрика MgO [5].

При спектральной сенсибилизации термопроявляемых композиций на основе галогенидов и стеарата серебра оптимальные концентрации адсорбированных красителей почти на два порядка выше, чем при

сенсибилизации традиционных галоидосеребряных фотоматериалов [1, 6]. Частицы стеарата серебра представляют собой вытянутые призмы высотой около микрона, а на этих призмах находятся кубические микрокристаллы галогенида серебра [1, 7]. Отношение площадей поверхностей стеарата и галогенида серебра $S_{A\,gSt}/S_{A\,gBr}$ около 30 и в первом приближении на стеарате серебра будет во столько же раз больше адсорбированных молекул красителя, что по порядку величины совпадает с оптимальными концентрациями сенсибилизирующих красителей в термопроявляемой композиции. Адсорбированные на стеарате серебра сенсибилизаторы высвечивают поглощенную ими фотовозбуждения в виде квантов люминесценции. При этом на галогенид серебра попадает не только прямой свет люминесценции, но и часть света, отражаемая, как в световоде, от внутренних поверхностей частицы стеарата серебра [8]. Такой процесс обусловлен тем, что стеарат серебра имеет достаточно большой показатель преломления: n = 1.515 [9].

термопроявляемой композиции свет люминесценции адсорбированного на стеарате красителя может поглошаться адсорбированным на галогениде серебра красителем, поскольку красители имеют сильно перекрывающиеся спектры поглощения и люминесценции. Эффективность спектральной сенсибилизации термопроявляемых композиций одними и теми же красителями намного выше, чем для традиционных фотоматериалов [1, 6]. Исследования спектральной чувствительности фотослоев и поглощения красителей показали, что вклады красителей, адсорбированных на бромиде серебра, и красителей, адсорбированных на стеарате серебра, в общий процесс спектральной сенсибилизации примерно одинаковы [10].

- 1. Горяев М. Физ. основы фотохимии тв. тела. Saarbrucken: Lambert Acad. Publ., 2013.
- 2. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Сб.научных трудов III Всеросс. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С.109-110.
 - 3. Акимов И.А., Горяев М.А. // Журнал физической химии. 1984. Т.58. №5. С.1104.
 - 4. Горяев М.А. // Письма ЖТФ. 1980. Т.б. Вып.11. С.1132.
 - 5. Горяев М.А. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т.51. Вып.6. С.1016.
- 6. Горяев М.А., Колесова Т.Б. и др. // Технологии и свойства материалов для записи информации. Сб. научн. трудов НИИХимФотоПроект. М.: 1992. С.67.
 - 7. Горяев М.А. // Журнал прикладной химии. 1994. Т.67. Вып.6. С.963.
 - 8. Горяев М.А. Письма ЖТФ, 1994, т.20, в.21, с.40
 - 9. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Известия РГПУ. 2012. N144. C.29.
 - 10. Горяев М.А. // Журнал научной и прикладной фотографии. 1998. Т.43. №3. С.1.

Д.А. КЛЮКИН, В.С. ЛЕОНТЬЕВА, А.И. СИДОРОВ, А.И. ИГНАТЬЕВ, Н.В. НИКОНОРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ УФ-ЛАЗЕРОМ

Экспериментально показано, что воздействие наносекундных лазерных импульсов ближнего УФ-диапазона на серебросодержащие стекла, предварительно облученные УФ-лампой и термообработанные, приводит к тушению люминесценции в области облучения, а последующее облучение УФ-лампой или термообработка стекла восстанавливает люминесценцию в этой области. Это может быть использовано для записи и хранения информации.

D.A. KLYUKIN, V.S. LEONTIEVA, A.I. SIDOROV, A.I. IGNATIEV, N.V. NIKONOROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

DATA STORAGE IN THE LUMINESCENT GLASSES UNDER UV LASER RADIATION

It was shown experimentally, that in initially UV irradiated and heat-treated glasses the luminescence intensity reduce after the nanosecond laser irradiation at 355 nm wavelength. Subsequent the UV lamp irradiation or heat treatment results in the luminescence recovering. This technique can be applied in the data storage.

Целью ланной работы являлось исследование процессов, серебросодержащих происходящих предварительно стеклах. облученных УФ-лампой И термообработанных, воздействии при наносекундных лазерных импульсов с длиной волны 355 нм. Исследовались силикатные стекла системы Na₂O-ZnO-Al₂O₃-SiO₂-NaF-NaCl с добавкой Ag₂O (0.12 мол.%), Sb₂O₃ (0.04 мол.%), CeO₂ (0.01 мол.%). Полированные пластины стекла толщиной 1-1,5 мм облучались импульсами YAG:Nd лазера LS-2131M (LotisTII) с длиной волны $\lambda = 355$ нм на третьей гармонике, максимальной энергией в импульсе 27 мДж. длительностью импульса 5 нс и частотой повторения 5 Гц. Лазерный луч фокусировался линзой с фокусным расстоянием 10 см.

Стекло, предварительно облученное УФ-лампой и термообработанное при температуре 400°С, обладает яркой люминесценцией в видимой области спектра с пиком интенсивности на 580 нм при возбуждении излучением в диапазоне 300-440 нм. Люминесценция стекла связана с присутствием в нем нейтральных молекулярных кластеров серебра 1.2. В ходе эксперимента третья гармоника излучения лазера фокусировалась с помощью собирающей линзы, а образец помещался перед задним фокусом линзы таким образом, чтобы диаметр сечения лазерного пучка составлял 1 мм. В ходе экспериментов было установлено, что в облученной области происходит тушение люминесценции (рис. 1б). Лазерное воздействие приводит к увеличению поглощения стекла в спектральном интервале 300-550 нм, что вызвано возникновением дефектов сетки стекла (рис. 1а). Показано, что величина дозы облучения влияет на оптическую плотность в облученной области. При энергии импульса излучения менее 20 мДж эффект полностью пропадает.

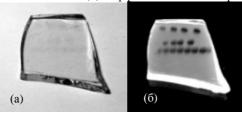


Рис. 1. Фотографии стекла после облучения наносекундными импульсам с разным количеством импульсов и разной энергией в импульсе (а), люминесценция образца после лазерного облучения (б), длина волны возбуждения 365 нм

При последующем УФ-облучении благодаря процессу фотоионизации происходит перераспределение электронов с возвратом молекулярных кластеров серебра в нейтральное состояние. Это восстанавливает люминесценцию в облученной области. Термообработка ниже температуры стеклования приводит к такому же результату, благодаря тому, что при нагреве ионы сурьмы отдают электроны в стекло, что способствует переводу молекулярных кластеров серебра в нейтральное состояние. Полученные результаты могут быть использованы для записи и перезаписи оптической информации в серебросодержащих стеклах наносекундными лазерными импульсами.

- 1. Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Шахвердов Т.А. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т.114. С.838.
 - 2. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., et. al. // Optical Materials. 2014. V.36. P.753.

А.В. ЕГОРЫШЕВА 1 , П.В. ФЕДОТОВ 2 , Е.Д. ОБРАЗЦОВА 2 , А.П. МЕЛЕХОВ, Т.Д. ДУДКИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

НОВЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ СОСТАВА $60B_2O_3$ – $32CaF_2$ – $8Bi_2O_3$, ЛЕГИРОВАННЫХ Ст и Nd

Впервые синтезированы стекла состава $60B_2O_3$ – $32CaF_2$ – $8Bi_2O_3$, содержащие хром и неодим, и изучены их люминесцентные свойства. Показано, что хром в стеклах данного состава присутствует в двух степенях окисления +3 и +4. Установлен факт переноса энергии с иона Bi^{3+} на Nd^{3+} и Cr^{3+} .

A.V. EGORYSHEVA¹, P.V. FEDOTOV², E.D. OBRAZTSOVA², A.P. MELEKHOV, T.D. DUDKINA

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

¹Kurnakov institute of general and inorganic chemistry of the RAS, Moscow

²Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

NEW LUMINOPHORES ON BASIS OF 60B₂O₃-32CaF₂-8Bi₂O₃ GLASSES DOPED WITH Cr AND Nd

 $60B_2O_3$ – $32CaF_2$ – $8Bi_2O_3$ glasses doped with chromium and neodymium have been prepared and their luminescence properties have been studied for the first time. It has been shown that the glasses contain chromium in two oxidation states +3 and +4. Energy transfer from Bi^{3+} to Nd^{3+} and Cr^{3+} has been demonstrated.

Висмут-боратные стекла имеют ряд преимуществ по сравнению с наиболее часто используемыми силикатными. Они имеют 1000°C), температуры плавления (до что лелает их более предпочтительными с точки зрения технологии, отличаются высокими показателя преломления, плотности, диэлектрической проницаемости. При этом они демонстрируют достаточно широкую область прозрачности в видимом и ИК-диапазонах. В настоящей работе рассмотрена люминесценция ионов Nd^{3+} и Cr^{3+} в присутствии ионов Bi^{3+} в стеклах состава $60B_2O_3$ – $32CaF_2$ – $8Bi_2O_3$ (BCB), соответствующего области устойчивости стекол этой системы. Необходимо отметить, что сведения об изучении люминесценции стекол этой системы в литературе отсутствуют.

Люминесценция нелегированного образца обусловлена ионом ${\rm Bi}^{3+}$ и наблюдается только в видимой области. Спектр содержит широкую полосу излучения с максимумом при 470 нм (21300 см $^{-1}$). Люминесценции в области 1100–1300 нм (9100–7700 см $^{-1}$) в этом образце не наблюдалось, что указывает на отсутствие в данном образце висмута в субвалентных степенях окисления. Спектр образца, легированного Nd, представлен на рис 1А. Как видно, при возбуждении люминесценции светом 360 нм (27800 см $^{-1}$) из области края фундаментального поглощения на фоне широкой полосы, связанной с излучательным переходом иона Bi^{3+} , проявляются слабые полосы поглощения иона Nd^{3+} . Такой вид спектра свидетельствует о переносе энергии с иона Bi^{3+} на Nd^{3+} .

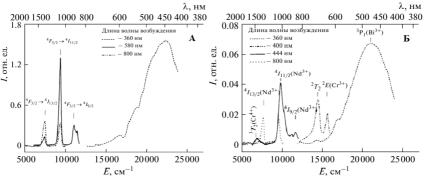


Рис. 1. Спектр люминесценции стекла BCB-Nd (A), спектр люминесценции стекла BCB-(Nd + Cr) (Б)

Люминесценция образца, одновременно легированного хромом и отличается BCB-Nd неодимом, существенно ОТ (рис. 1Б). возбуждении светом с длиной волны 360 нм (27800 см-1) наблюдается широкая полоса с максимумом при 480 нм (20800 см⁻¹), аналогичная случаю BCB-Nd, но меньшей интенсивности. Это указывает на то, что энергия с иона Bi^{3+} переходит не только на Nd^{3+} , но и на Cr^{3+} . Как показано в ряде работ [1], при совместном легировании хромом и неодимом возможен переход энергии $Cr^{3+} \to Nd^{3+}$. В синтезированном нами образце данный эффект не наблюдается. Также показано, что хром входит в стекло в двух степенях окисления – 3+ и 4+. Сделано предположение о возможном переносе энергии $Nd^{3+} \to Cr^{4+}$.

Список литературы

1. Rodriguez-Mendoza U.R., et. al. Optical properties of single doped Cr3+ and codoped Cr3+–Nd3+ aluminum tantalum tellurite glasses // J. Alloys Compd. 2004. V.380. P.163-166.

М.М. СЕРГЕЕВ, В.П. ВЕЙКО, Е.И. МАТУЗИН

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ОБЪЕМЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТЕКОЛ

Исследован процесс локальной кристаллизации на дефектах, предварительно созданных мощным пикосекундным излучением в объеме фоточувствительного стекла, при воздействии на него излучением ${\rm CO_2}$ лазера.

M.M. SERGEEV, V.P. VEIKO, E.I. MATUZIN

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

DISTINCTIVE FEATURES OF DIRECT LASER-INDUCED 3D CRYSTALLIZATION OF FOTURAN GLASS

Processes of local crystallization in the volume of photosensitive glass (Foturan) plates during exposure by $\rm CO_2$ -laser on the microdefects, what are previously produced by picosecond laser pulses, are investigated.

Осуществление структурно-фазовых переходов в фоточувствительных стеклах (ФС) марки Foturan, инициируемое непосредственно лазерным излучением, имеет ряд преимуществ в отличие от общеизвестных методов обработки [1]. В частности, теряет необходимость длительная термообработка (ТО) ФС в печи, необходимая для зарождения и развития кристаллической фазы [2]. Кристаллизация ФС под действием излучения CO_2 лазера осуществляется за несколько минут, но только на поверхности и из расплава, а не из размягченного состояния, как при ТО в печи [3].

Для кристаллизации в объеме ФС предложен способ, когда при отжиге излучением CO_2 лазера кристаллическая фаза формируется на микродефектах, предварительно созданных в процессе оптического пробоя при воздействии на стекло мощным лазерным излучением [4]. Запись дефектов определенного размера осуществляется пикосекундными импульсами лазерного излучения ($\tau = 30$ пс). При последующем отжиге излучением CO_2 лазера температура нагрева поверхности ФС достигает значений выше температуры стеклования ($T_{CT} = 450$ °C), но не превышает температуру формирования кристаллов метасиликата лития и дисиликата

лития ($T_{KP} \sim 600$ °C), т.е. кристаллизация ФС происходит из размягченного состояния. В процессе воздействия излучением CO_2 лазера дефекты выполняют роль зародышей будущей кристаллизации. Они способны конкурировать с дефектами, существующими в виде микротрещин и сколов на поверхности ФС, при зарождении и дальнейшем формировании кристаллической фазы. Размером и месторасположением таких дефектов можно управлять, при этом размер дефекта варьируется от 1.5 мкм до 50 мкм и более. Зарастание дефекта в процессе воздействия излучением CO_2 лазера, а также рост кристаллической фазы, позволяют снять все напряжения в стекле, инициируемые созданием дефекта, а также уменьшить конечный размер формируемой области (рис.1).

В представленной работе рассмотрено влияние распределения температуры по толщине пластины ΦC на свойства областей кристаллизации, расположенных на различном удалении от облучаемой поверхности в процессе воздействия излучением CO_2 лазера. Также рассмотрены различные режимы лазерного облучения и определены оптимальные значения скорости нагрева, диапазона температур и длительности выдержки в этом диапазоне, приводящие к формированию кристаллической фазы в объеме ΦC . Исследованы два одновременно протекающих процесса: зарождение и формирование новой фазы в пределах дефекта, а также зарастание этого же дефекта.

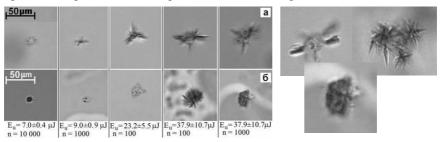


Рис. 1. Внешний вид дефектов (а) до и после (б) воздействия излучением CO_2 лазера при разных режимах облучения (Eu – энергия в импульсе и их число n)

- 1. Veiko V.P., Kieu Q.K., Nikonorov N.V, Skiba P.A. // J. of Laser Micro/Nanoengineering. 2006. V.1. P.149–154.
- 2. Livingston F.E., Helvajian H. # 3D laser microfabrication. Principles and Applications. Weinheim. WILEY-VCH. 2006. P.287–339.
- 3. Veiko V.P., Ageev E.I., Sergeev M.M., Petrov A.A., Doubenskaia M. // J. of Laser Micro/Nanoengineering. 2013. V.8. No.2. P.155–160.
- 4. Veiko V.P., Sergeev M.M., Ageev E.I., Petrov A.A. $/\!/$ Proc. of SPIE. 2013. V.9065. P.90650M.

И.А. ДЁМИЧЕВ, А.И. СИДОРОВ, Н.В. НИКОНОРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИОННОГО ОБМЕНА НА ВАЛЕНТНОЕ СОСТОЯНИЯ МЕДИ В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ

Рассмотрены оптические свойства силикатных стекол с медью, введенной методом ионного обмена в Cu(II)- и Cu(I)-содержащих расплавах при различной температуре и длительности. Характерные изменения структуры и интенсивности полос поглощения и люминесценции, а также профили показателя преломления позволяют сделать выводы о механизмах окислительно-восстановительных реакций и распределении валентных состояний меди по глубине стекла.

I.A. DEMICHEV, A.I. SIDOROV, N.V. NIKONOROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

THE ION-EXCHANGE SPECIFICS EFFECT ON VALENT STATES OF COPPER IN SILICATE GLASS

The work investigates optical properties of copper silicate glasses after Cu(II) or Cu(I)-melt ion-exchanges of various temperature and duration. We use refractive index profiles, luminescent and absorption spectra to identify the copper species distribution in the glass and their redox mechanisms.

Благодаря наличию меди в форме Cu^+ , Cu^{2+} , Cu^0 и молекулярных кластеров Cu_n стекла после ионного обмена (ИО) обладают широким рядом оптических свойств. Однако при этом процесс ИО усложняется.

ИО проводился в стекле K8 в расплаве 46CuSO₄:54Na₂SO₄, при T = 550-600°C; а также в расплаве 12CuCl:88ZnCl₂ при T = 350°C, 12 часов. Температура стеклования T_{σ} стекла K8 составляет 557°C.

Ионный обмен в расплаве Cu (II) происходит преимущественно в форме $\text{Cu}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+$. Вблизи поверхности, благодаря наличию связанной воды в трещиноватом слое стекла, наличию восстановителя As_2O_3 происходит восстановление: $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^+$. Далее происходит ИО Cu^+ по вакансиям натрия на глубину до 50 мкм, согласно фотографии торца люминесцентного волновода на вставке (рис. 1).

ИО при $T=550^{\circ}C < T_g$ сопровождается восстановительными условиями как при малых (1час), так и при больших (18 ч) длительностях. При этом образуются Cu^0 и молекулярные кластеры меди Cu_n , имеющие поглощение в спектральном диапазоне 300-500 нм (рис.). Повышение температуры до 585°C ускоряет восстановление и рост поглощения в области Cu_n . При длительности ИО 5ч восстановительные процессы сменяются окислительными. ИО продолжительностью 15 часов уже приводит к распаду молекулярных кластеров и росту полосы Cu^{2+} с длиной волны 800 нм (рис. 1).

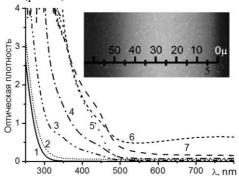


Рис. 1. Спектры поглощения силикатного стекла до (1) и после ионного обмена с медью в расплаве хлоридов (2) и сульфатов с разными температурами и длительностями: 600°C, 5 мин (3); 585°C, 15 часов (4); 585°C, 1 час (5); 600°C, 18 часов (6); 550°C, 18 часов (7)

В процессе ИО при температуре 600° С также происходит восстановление в стекле, но при длительности более 30 мин основную роль играет окисление. Через 18 часов ИО при 600° С интенсивность поглощения Cu^{2+} возросла на порядок. Согласно снятым нами послойным профилям поглощения, часть одновалентной меди преобразовалась в двухвалентную.

Согласно спектру поглощения (рис. 1), в стеклах после ИО в расплаве хлоридов не образуются Cu_n , Cu^{2+} , но есть ионы Cu^+ (поглощение на 280-300 нм). Медь находится в стекле в виде ионов Cu^+ после ИО $Cu^+ \leftrightarrow Na^+$.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-23-00136).

- 1. Ti Y., et. al. // J. Mater. Sci. 2008, V.43, P.7073.
- 2. Srikumar T., Kityk I.V., Rao C.S., et.al. // Ceram. Intern. 2011. V.37. P.2763.

С.К. ВАРТАПЕТОВ 1 , Д.В. ГАНИН 1,2 , К.Э. ЛАПШИН 1 , А.З. ОБИДИН 1

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВНУТРИОБЪЕМНЫХ СТРУКТУР В ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Представлены результаты экспериментов по прецизионной обработке материалов фемтосекундным лазером. Определены условия возникновения и описаны некоторые характерные признаки особого режима микрообработки, когда при определенном соотношении скорости сканирования образца и частоты импульсов ФС лазера, разрушенная лазерным излучением область смещается к объективу и обратно, формируя внутри образца «циклические» структуры.

S.K. VARTAPETOV¹, D.V. GANIN^{1,2}, K.E. LAPSHIN¹, A.Z. OBIDIN¹

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute) ²Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

FEMTOSECOND LASER FABRICATION OF CYCLIC STRUCTURES IN BULK OF TRANSPARENT DIELECTRICS

The results of experiments on precision material processing by femtosecond laser. Were determined conditions for the appearance and describes some of the characteristics of a special regime of micromachining, when a certain ratio of scan speed and the frequency of laser pulses, destroyed by laser radiation area moves along the optical axis to the lens and back, forming inside the sample "cyclic" structures.

Для решения многих задач необходима точная фокусировка энергии лазерного излучения в микрообласти, лежащие внутри обрабатываемого объекта. Однако при наличии продольной сферической аберрации, форма внутренних микроразрушений может сильно отличаться от сферы и иметь вид филаментов, форма и размеры которых зависят от параметров фемтосекундного (ФС) лазера, образца и условий эксперимента [1, 2].

Целью работы являлось определение условий возникновения недостаточно изученного явления, заключающегося в том, что в прозрачных диэлектриках область микроразрушения, образованная ФС лазерным излучением самоиндуцированно смещается к объективу и

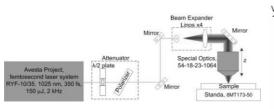


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

обратно, образуя внутри образца циклические структуры с характерным набором признаков.

Известно [3], что степень перекрытия играет важную роль в процессе микрообработки. Для того чтобы определить роль этого параметра применительно к нашему случаю, был поставлен следующий

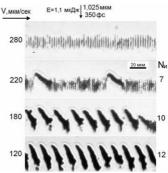


Рис. 2. Микрофотографии объемных разрушений образца из ПК, созданных ФС импульсами при различных скоростях сканирования

эксперимент. Образец из поликарбоната (PC) устанавливался на трансляционный столик (рис. 1) и перемещался перпендикулярно лучу лазера слева направо, с дискретным набором скоростей $V_{c\kappa}$ от 280 до 40 мкм/сек. Частота следования ФС импульсов $F=100~\Gamma$ ц, энергия импульса $E_u=1,1~$ мкДж, глубина фокусировки в образец $f_d\approx1~$ мм. На рис. 2 представлены следы воздействия ФС импульсов в виде наклонных полостей в образце, при различных $V_{c\kappa}$. Анализ рис. 2 позволяет выявить набор признаков, характерных для изучаемого режима. При движении образца в направлении $V_{c\kappa}$ область разрушения смещается также и по направлению к объективу от импульса к импульсу, затем возвращается в исходное положение (на глубину fd) и далее следует очередной «цикл». Количество импульсов задействованных в одном «цикле», уменьшается с ростом Скорости сканирования. Длина каждой полости уменьшается с ростом $V_{c\kappa}$, при этом угол наклона этих внутренних полостей к направлению сканирования изменяется, уменьшаясь по мере роста $V_{c\kappa}$.

Результаты проведенного исследования с учетом влияния описанного режима были использованы в технологии прецизионного резания кристаллов, стекол, полимеров. Лучшее качество поверхностей реза достигается в условиях, исключающих возникновение такого режима.

- 1. Sun Q., Jiang H., Liu Y., Zhou Y., Yang H., Gong Q. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2005.V.7.
- 2. Saerchen E., Liedtke S., Schlage F., Will F., Lubatschowski H. // Proc. SPIE. 2013. V.8803.
- 3. Lubatschowski H., Rathjen C. // Patent №US20070055221. 2007.

Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, М.М. СЕРГЕЕВ, Г.К. КОСТЮК, В.П. ВЕЙКО, Е.Б. ЯКОВЛЕВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

Новая лазерная технология поверхностной модификации стекла представлена в данной работе. Технология базируется на поглощении лазерного излучения пластиной прессованного графита, находящейся в контакте с пластиной стекла, что приводит к контролируемой модификации поверхности стекла.

R.A. ZAKOLDAEV, M.M. SERGEEV, G.K. KOSTYUK, V.P. VEIKO, E.B. YAKOVLEV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

LASER-INDUCED MICROOPTICAL ELEMENTS FORMATION ON THE GLASS SURFACE

A new technique for surface glass modification is suggested in this research work. The method is based on the heating of glass by graphite plate being placed in direct contact with the back glass surface. We created and investigated diffraction phase gratings, random phase plate and microlense arrays.

Миниатюризация оптических компонент, начавшаяся более 30 лет тому назад, привела к возникновению нового раздела оптики, известного под названием микрооптика, основу которого в настоящее время составляют расчет, проектирование, разработка технологий изготовления и исследований микрооптических элементов (МОЭ) и массивов из них, создаваемых на поверхности различных материалов, в том числе и стеклообразных. Под массивами МОЭ, широко востребованными в таких развивающихся областях быстро как интегральная оптика, оптоэлектроника, лазерная и медицинская техника фотоника. подразумевается набор МОЭ, расположенных определенным образом и с определенным коэффициентом заполнения в пределах массива, в зависимости от решаемой массивом задачи, на поверхности стекла или стеклообразного материала.

В лазерных системах МОЭ широко используются для гомогенизации лазерных пучков, создания из одного пучка лазерного излучения нескольких с равной интенсивностью, для управления мощностью излучения лазеров, в измерительной и медицинской технике [1-2].

Начиная с конца 80x годов, для изготовления массивов MO стали широко применяться лазерные технологии. Таким образом, формирование MOЭ на поверхности стекла было реализовано под действием излучения CO_2 лазера, лазеров с длиной волны излучения УΦ-диапазона, излучение с ультракороткой длительностью импульса [3]. Также для создания MOЭ может быть использована технология, основанная на сильном поглощении излучения лазера водным раствором неорганического или органического вещества [4], контактирующего с тыльной стороной пластины стекла.

В данной работе представлена новая лазерная технология для модификации поверхности стекол, которая позволяет использовать излучение, прозрачное для обрабатываемого материала. Технология базируется на поглощении лазерного излучения пластиной прессованного графита, находящейся в контакте с пластиной плавленого кварца. Сканирование сфокусированного пучка лазерного излучения в плоскости контакта плавленого кварца и прессованного графита приводит к нагреву плавленого кварца выше температуры размягчения, а механическое действие испаряющихся и разлетающихся, в ходе нагрева частиц графита, формирует рельеф МОЭ. Различные МОЭ были сформированы, такие как: дифракционные фазовые решетки (рис. 1а), случайные фазовые пластины (рис. 1б) и массивы микролинз (рис. 1в).

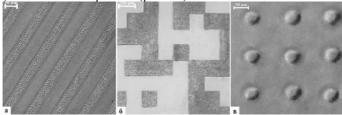


Рис. 1. Фотография МОЭ выполненная в проходящем свете: фазовая дифракционная решетка (а), случайная фазовая решетка (б), массив микролинз (в)

- 1. Bitterli R., et.al. // Optics express. 2010. T.18. №.13. C.14251-14261.
- 2. Nieto D., et.al. // J. Micro/Nanolithography, MEMS & MOEMS. 2012. V.11. №2. P.023014.
- 3. Borrelli N.F. Microoptics technology: fabrication and applications of lens arrays and devices. CRC Press, 2010. T.93.
 - 4. Niino H., et. al. // J. Laser Micro/Nanoeng. 2006. V.1. №1. P.39-43.

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ С РУПОРООБРАЗНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ВВОДА В СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

Представлена технология изготовления интегрально-оптических схем в стеклянных подложках с рупорообразным элементом ввода излучения и геометрические размеры рупорообразного элемента.

M.M. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO

Kuban state university, Krasnodar

FABRICATION OF GLASS INTEGRATED OPTICAL CIRCUITS WITH HORN ELEMENT FOR RADIATION INPUT

Technology of glass integrated optical circuits fabrication with horn element for radiation input is presented, including dimensions of horn.

В интегральной оптике до настоящего времени актуальными остаются вопросы эффективного согласования источников излучения волноводными структурами, поэтому создание интегрально-оптических рупорных соединений, упрощающих стыковку источников света с интегрально-оптическими схемами, является актуальным. Целью работы является создание интегрально-оптической схемы электростимулированного ионного обмена, в которой, для упрощения ввода оптического излучения, вводной канальный волновод выполнен в виде рупора.

При изготовлении интегрально-оптической схемы с рупорообразным волноводом для ввода излучения использовалась подложка из стекла от фотопластин размером 30×30×1,25 мм. На одну плоскость стеклянной подложки 1 методом термического напыления наносился маскирующий слой алюминия 2, в котором фотолитографией создавались щели для формирования интегрально-оптической схемы (рис. 1а). противоположной плоскости стеклянной подложки располагался игольчатый катод 3 напротив канального волновода у края подложки. Стеклянная подложка приводилась в соприкосновение с расплавом солей 4 AgNO₃ и NaNO₃, взятых в молярном соотношении 1:10. Температура расплава была 380°C, время электростимулированной миграции ионов — 30 минут. Между игольчатым катодом 3 и анодом 5, погруженным в расплав соли, прикладывалось стимулирующее напряжение величиной 50 В (рис. 1б). Поскольку напряженность электрического поля у игольчатого катода выше, чем на остальных участках стеклянной подложки, то и процесс внедрения ионов серебра в подложку через маскирующий слой проходит быстрее, создавая напротив игольчатого катода утолщение волновода [1].

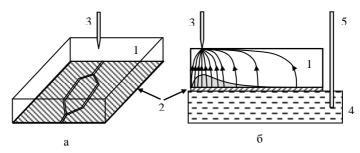


Рис. 1. Стеклянная подложка с маской волноводной структуры (a) и распределение силовых линий электростатического поля в процессе миграции ионов (б)

В результате была изготовлена интегрально-оптическая схема, оканчивающаяся рупорообразным волноводом для ввода излучения. На рис. 2 представлены внешний вид и размеры входного (рис. 2a) и выходного (рис. 2б) торцов рупорообразного волновода для ввода излучения в интегрально-оптическую схему.

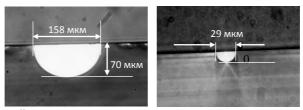


Рис. 2. Внешний вид и размеры входного и выходного торцов рупорообразного волновода для ввода излучения в интегрально-оптическую схему

Список литературы

1. Яковенко Н.А., Никитин В.А., Векшин М.В. Способ изготовления интегральнооптической схемы в стеклянной подложке с рупорообразным волноводом. Пат. 2524460 РФ. МПК G02B6/13 (Россия). № 013106617/28; заявл. 14.02.2013; опубл. 27.07.2014.

В.П. ВЕЙКО, Ю.Ю. КАРЛАГИНА, Г.В. ОДИНЦОВА, А.Л. СКУРАТОВА, Д.А. СНЫТКИНА, Р.М. ЯЦУК 1

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики ¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Л.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЦВЕТНЫХ СТРУКТУР НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАРАЩИВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК

В данной работе представлена технология формирования цветных оксидных структур на поверхностях нержавеющей стали и титана излучением волоконного лазера. Предложен метод управления цветовой палитрой путем послойного наращивания оксидных пленок. Приведены теоретические и экспериментальные результаты определения толщин полученных пленок, а также проведено спектрофотометрическое исследование обработанной поверхности.

V.P. VEIKO, Yu.Yu. KARLAGINA, G.V. ODINTSOVA, A.L. SKURATOVA, D.A. SNYTKINA, R.M. YATSUK¹

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

¹Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

LASER FORMATION OF COLOR STRUCTURES ON METAL SURFACES BY MEANS OF LAYERED GROWTH OF OXIDE FILMS

In this investigation the technology of color oxide treatment of stainless steel and titanium surfaces by fiber laser radiation is presented. The method of color palette control on the basis of layered growth of oxide films is proposed. Theoretical and experimental results of thickness tests for obtained films are described as well as spectrophotometrical research of processed surface was conducted.

В предыдущих работах [1] авторами была представлена технология формирования цветных структур на поверхностях некоторых металлов и сплавов при облучении иттербиевым импульсным волоконным лазером наносекундной длительности импульсов. Было показано, что при лазерном локальном нагреве поверхностей нержавеющей стали

10X18H10T и технического титана BT1-0 образуются двухслойные оксидные структуры, при этом интегральный цвет поверхности металлов определяется как интерференционными эффектами в тонком верхнем оксидном слое, так и цветом массивного нижнего окисла [2].

Данная технология может найти применение при создании произведений декоративно-прикладного искусства, в ювелирном производстве, в рекламном бизнесе, в приборо- и машиностроении, при маркировке медицинской техники и коллекционного оружия [3].

Авторами работы предложен метод управления получаемой на металлах цветовой палитрой путем послойного наращивания оксидных пленок и её коррекции за счет повторного окисления уже обработанной поверхности. В работе приведены результаты расчета толщин оксидных пленок методом химической термодинамики, которые подтверждаются экспериментальными данными определения толщин пленок, измеренными с помощью микроинтерферометра МИИ-4М. Показана зависимость средней толщины пленки от технологического коэффициента цветности C_{tech} (подробнее о параметре C_{tech} см. [1]).

- 1. Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Yu., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // Optics Express. 2014. V.22. I.20. P.24342-24347.
- 2. Veiko V.P., Slobodov A.A., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Physics. 2013. V.23. P.066001.
- 3. Ahsan Md.Sh., et al. Colorizing stainless steel surface by femtosecond laser induced micro/nanostructure // Applied Surface Science. 2011. V.257. P.7771-7777.

Н.Г. МИРОННИКОВ 1,2 , В.П. КОРОЛЬКОВ 1,2

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск ²Новосибирский государственный университет

ПОЛИМЕРНЫЙ ТЕРМООПТИЧЕСКИЙ КОРРЕКТОР ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Исследован настраиваемый термооптический корректор, способный компенсировать тепловую линзу твердотельного лазера. Рабочая среда корректора представляет собой эластичный полимер марки Sylgard 184, заключенный между двух кварцевых пластин. Конструкция корректора позволяет осуществить настройку оптических характеристик методом механического сжатия рабочей среды. Получены зависимости оптической силы корректора, термооптического коэффициента и коэффициента расширения рабочей среды корректора от механического сжатия. Исследовано распределение искажений волнового фронта, создаваемое корректором. Апробирована технология формирования градиентной оптической структуры в рабочей среде, которая в перспективе позволит исправить нелинейные аберрации тепловой линзы кристалла.

N.G. MIRONNIKOV^{1,2}, V.P. KOROLKOV^{1,2}

¹Institute of automation and electrometry SB RAS, Novosibirsk ²Novosibirsk state university

CREATE THE THERMOOPTICAL CORRECTORS TO FIX OF THE THERMAL LENS OF SOLID STATE LASERS

In this paper the adaptive adjustable thermooptical corrector which to able compensated the thermal lens of a solid-state laser is created. The working medium of corrector is an elastic polymer Sylgard 184 contained between two quartz plates. The corrector has a possibility of optical characteristics adjustment by mechanical compression of the working medium. The physical characteristics, such as optical power, the thermo-optic coefficient, coefficient of expansion of the working medium of the corrector have been obtained. The distribution of wavefront distortion produced by the corrector has been studied. Technology of creating a gradient optical structure in the working medium has been tested.

Тепловая линза одна из главных проблем, которая не позволяет добиться высокого качества излучения сверхмощных твердотельных лазеров [1]. Тепловая линза вызвана тепловыми и механическими неоднородностями лазерного кристалла, воздействие которых на световой

пучок аналогично линзе. Для устранения аберраций приходится учитывать влияние тепловой линзы при конструировании лазера, а также использовать разнообразные компенсационные пассивные и активные элементы.

Известны термооптические корректоры в которых возникает обратная тепловая линза, компенсирующая тепловую линзу лазерного кристалла [2]. Преимущества таких корректоров заключается в сочетании невысокой цены, относительной простоты изготовления и наличия достаточно широкого диапазона выходной мощности, при котором лазер генерирует пучок со слабо изменяющейся расходимостью.

В настоящей работе исследуется адаптивный настраиваемый термооптический корректор, который состоит из рабочей среды эластичного полимера марки Sylgard 184, заключенного между двух кварцевых платин. Корректор имеет функцию настройки оптических параметров методом сжатия рабочей среды, и обладает свойством адаптивности — сохранение компенсации при перестройке мощности лазера. Апробирован способ изготовления корректоров, при котором возникает градиент термооптических параметров.

Для исследования влияния корректора на волновой фронт светового пучка гелий-неонового лазера (632 нм), создана интерферометрическая установка по схеме Маха-Цендера. Нагрев среды корректора осуществляется пучком инфракрасного лазера с длинной волны 10,6 мкм,.

Для измерения зависимости термооптического коэффициента и коэффициента расширения рабочей среды корректора от механического сжатия создана установка на основе интерферометра Фабри-Перо для измерения термооптического коэффициента и коэффициента расширения материала [3].

- 1. Мезенов А.В. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986.
- 2. Roth M, Romano V, et. al. Self-compensating amplifier design for CW and Q-switched high-power Nd:YAG lasers // Opt Express. 2006. V.14 (6). P.2191.
- 3. Jewell J.M., Askins C., Aggarwal I.D. Interferometric method for concurrent measurement of thermo-optic and thermal expansion coefficients // Applied Optics. 1991. V.30. No.25.

О.Б. АНАНЬИН, Г.С. БОГДАНОВ, И.А. ГЕРАСИМОВ, А.П. МЕЛЕХОВ, И.К. НОВИКОВ, В.В. ПИРОГ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пространственное распределение интенсивности лазерного излучения может изменяться в процессе взаимодействия с плазмой. Причиной этого может быть пространственная неоднородность плазмы.

O.B. ANAN'IN, G.S. BOGDANOV, I.A. GERASIMOV, A.P. MELEKHOV, I.K. NOVIKOV, V.V. PIROG

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

INFLUENCE OF LASER PLASMA ON SPATIAL-TEMPORAL DISTRIBUTION OF THE INTENSITY HIGH-POWER LASER RADIATION

The spatial distribution of the intensity of the laser radiation can change during the interaction with the plasma. It may be caused by the spatial inhomogeneity of the plasma.

Настоящее исследование, как и ряд других работ [1], посвящено изучению влияния веществ с низкой плотностью, включая плазму, на пространственно-временные параметры лазерного излучения. Очевидно, что плазма, как любое другое вещество, поглощает и рассеивает проходящее сквозь него излучение. Можно предположить, что все элементы спекл-структуры лазерного излучения будут ослабляться приблизительно одинаково. Но эксперименты показывают, что процессы взаимодействия излучения с плазмой более сложные.

Параметры лазерного излучения: энергия в импульсе $E \le 28$ Дж, длительность импульса $\tau \approx 15$ нс, апертура пучка $d \approx 48$ мм и интенсивность в фокусе линзы $I \approx 10^{12} \, \mathrm{Bt/cm}^2$.

Для контроля пространственно-временных параметров лазерного излучения применялась быстродействующая стрик-камера К008 (БИФО). Ниже, на рис. 1A, показан результат, записанный в стрик-режиме камеры К008. На этом рисунке метки X1 и X2 соответствуют разным

пространственным координатам по высоте щели. На рис. 1Б показаны сигналы полученные в разных экспериментальных условиях.

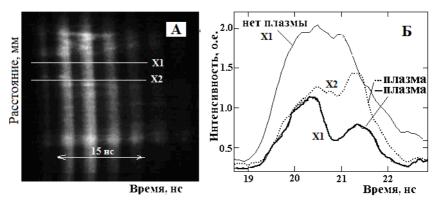


Рис. 1. Характерное изображение пространственно-временного распределения интенсивности лазерного излучения, записанное в режиме щелевой развертки K008(A), локальное (по высоте щели) поведение интенсивности лазерного луча для двух случаев: без плазмы (в точке X1) и с плазмой (точки X1 и X2) (Б)

На рис. 1Б показаны результаты обработки экспериментальных данных. Показанные кривые описывают локальное поведение интенсивности лазерного луча в фиксированных координатах X1 и X2 для двух разных экспериментов: без плазмы и с лазерной плазмой. При прохождении лазерного луча через плазму, образованную этим же лазерным излучением на майларовой плёнке толщиной 3 мкм, происходит ослабление интенсивности спекла с координатой X1 (жирная кривая). При этом поведение интенсивности в соседней координате X2 в (прерывистая кривая) похоже на динамику интенсивности для случая отсутствия плазмы (тонкая непрерывная кривая).

Механизм ослабления отдельного элемента спекл-картины лазерного излучения, очевидно, связан с локальными параметрами плазмы и общей неоднородностью образуемой лазерной плазмы в начальные моменты времени.

Список литературы

1. Акунец А.А. и др. Особенности прохождения лазерного излучения с длиной волны 0.438 мкм и с интенсивностью (3÷7)·10¹⁴ Вт/см² через подкритическую плазму из полимерных аэрогелей. Препринт ФИАН №8, 2007.

В.Ф. БАБАНИН, Б.А. МАЙЕР 1 , А.В. ИВАНОВ 2 , Н.В. МИХАЛЕВА, Ю.Г. ОМЕЛЬЯНЮК

Ярославский государственный технический университет

¹Ланкастерский университет, Великобритания

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПРИМЕНЕНИЕ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ⁵⁷Fe И МАГНИТОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОСИНТЕЗА МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ МИНЕРАЛОВ В ЖИВОМ ВЕЩЕСТВЕ И ПОЧВАХ

Методом мёссбауэровской спектроскопии и магнитометрии показано что при переменном режиме увлажнения-иссушения образцов моделирующих натуральные почвы образуются магнетит и грейгит.

V.F. BABANIN, B.A. MAHER¹, A.V. IVANOV², N.V. MIHALEVA, Yu.G. OMEL'ANUK

Yaroslavl state technical university

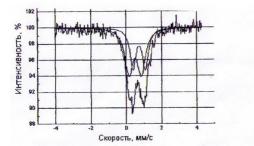
¹Lancaster university, UK

²Lomonosov Moscow state university

APPLICATION OF MOSSBAUER SPECTROSCOPY ⁵⁷Fe AND MICROSCOPY TECHNIQUES TO STUDY THE BIOSYNTHESIS OF MAGNETO-ORDERED MINERALS IN LIVING MATTER AND SOILS

By Mossbauer spectroscopy and magnetometry techniques shown in alternating mode, wetting-drying specimens simulating natural soil are magnetite and greigit.

Для доказательства биогенного вклада магнетизма верхних горизонтов автоморфных почв необходимо было синтезировать биоминералы с помощью естественного ценноза бактерий. С этой целью был отобран ил на глубине 40 см в ямах на болоте на водосбросе. Ил был помещен в водоем, заполненный водой из пруда, установленный в жилом помещении. По мере испарения воды и иссушения остатка водоем заполняли отваром хвои, который содержит хинную кислоту. В течение семи лет эта процедура повторялась, и велось постоянное наблюдение.



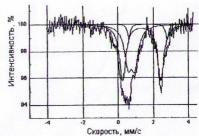


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры магниточувствительных бактерий естественного ценноза: молодые культуры (а); после культивирования в течение 1,5 лет (б)

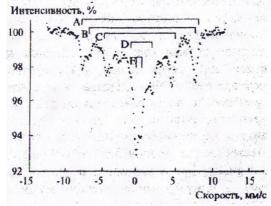


Рис. 2. Спектры ЯГРС культуры через семь лет культивирования с переменным режимом увлажнения: A,B - отмечены линии поглощения магнетита, С - линии поглощения грейгита, D - остаточный двухвалентный предшественник полученных минералов, F - линии феригрейгита

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, проект №06044856а. Выражаем благодарность за помощь в подготовке тезисов к публикации И.П. Бойченко.

- 1. Бабанин В.Ф., Бакулин Л.М. и др. Моделирование биосинтеза нанокластеров природного магнетита // ММТТ 20: сборник трудов. Ярославль: ЯГТУ, 2007. Т.7. С.108-110.
 - 2. Киршвинк Дж. Биогенный магнетит и магниторецепция. М.: Мир, 1989.
- 3. Бабанин В.Ф., Васильев С.В., и др. Технологические и экологические применения мёсбауэровской спектроскопии / ред. В.В. Морозов и В.Ф. Бабанин. Ярославль: ЯГТУ, 2011.
 - 4. Бабанин В.Ф., Трухин В.И. и др. Магнетизм почв. Ярославль: ЯГТУ, 1995.
 - 5. Данон Ж. Магнетизм и микроорганизмы. М.: Знание, 1986. С.187-196.

В.Ф. БАБАНИН, А.В. ИВАНОВ¹, В.В. ФРОЛОВ

Ярославский государственный технический университет ¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СОСТАВ СИЛЬНОМАГНИТНОЙ ФАЗЫ ПОЧВ ПО ДАННЫМ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ⁵⁷Fe и МАГНИТОМЕТРИИ

Изучены магнитные свойства и состав соединений железа сильномагнитных минералов из почв и атмосферных осадков, образующих сильномагнитную фазу гумусовых горизонтов автоморфных почв. В гидроморфных условиях сильномагнитная фаза интенсивно разрушается, что приводит к резкой деформации магнитного профиля почв.

V.F. BABANIN, A.V. IVANOV¹, V.V. FROLOV

Yaroslavl state technical university ^ILomonosov Moscow state university

ORIGIN AND COMPOSITION OF THE STRONGLY MAGNETIC PHASE OF THE SOIL ACCORDING MOSSBAUER SPECTROSCOPY ⁵⁷FE AND MAGNETOMETRY

The magnetic properties and the composition of the iron compounds strongly magnetic minerals from the soil and precipitation forming a strongly magnetic phase of humus horizons of automorphic soils; In hydromorphic conditions strongly magnetic phase intensively destroyed, leading to a sharp magnetic deformation of the soil profile.

В середине прошлого века было установлено возрастание магнитных параметров в гумусоаккумулятивных горизонтах автоморфных почв: удельных магнитной восприимчивости (χ) и намагниченности насыщения (σ_s) (рис. 1а). В соответствие с экспериментом повышенная (χ) связана с присутствием в них магнитных частиц, которые попадают в почву из атмосферы, состав частиц — магнетит, металлическая α -железо, гематит, частицы гидроксидов в суперпарамагнитном состоянии.[1, 3]. Независимо от природы источника сильномагнитных частиц они вносят заметный вклад в магнетизм почв, вовлекаются в процесс почвообразования.[2, 4, 5] В результате формируется магнитный профиль почвы, характерный для данной почвенно-географической зоны (рис. 1). Типичные спектры ЯГРС на 57 Fe (рис. 1б).

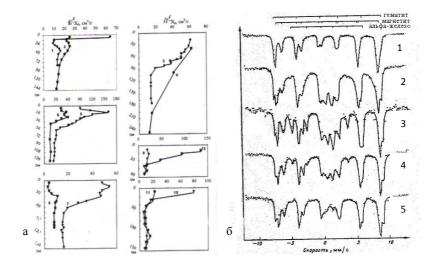


Рис. 1. Профильное распределение начальной удельной магнитной восприимчивости некоторых почв (а); спектры ЯГР магнитных фракций, выделенных из разных образцов [1,2,4] (б): 1 - из пыли внутри жилого помещения;

- 2 из твердого осадка в январском снегу; 3 из песка на поверхности карьера;
- 4 из мохового покрова на поверхности карьера; 5 из горизонта A_0 дерновоподзолистой почвы

- 1. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. Ярославль: ЯГТУ, 1995.
- 2. Взаимодействие мёсбауэровского излучения с веществом /под ред. Р.Н. Кузьмина. М.: МГУ, 1987.
- 3. Бабанин В.Ф., Васильев С.В., Залуцкий А.А. и др. Технологические и экологические применения мёсбауэровской спектроскопии. Ярославль: ЯГТУ. 2011.
- 4. Бабанин В.Ф., Иванов А.В., Куткин И.А., Седьмов Н.А. Морфология и мёссбауэровская спектроскопия, сильномагнитных сферул из почв Ярославской области // Геохимия. 1987. №12. С.1792-1798.
- 5. Gajdardzisk-Josifovska M., McClean R.G., et.al. // European Journal of mineralogy. 2001. V.13. P.863-870.

И.А. АНТОНОВА 1,2 , А.П. БОЛЬШАКОВ 2 , В.Ю. ЮРОВ 2

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

СПЕКТРОСКОПИЯ СВЧ-РАЗРЯДА ПРИ CVD РОСТЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Исследовались возможности оптимизации быстрого роста монокристаллических алмазных пленок, полученные методом осаждения из газовой фазы (CVD). Для этого определена температура CBЧ-разряда ($T \approx 2200 \text{ K}$) методом оптической пирометрии без использования данных об излучательной способности.

I.A. ANTONOVA^{1,2}, A.P. BOLSHAKOV², V.Yu.YUROV²

¹National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)
²Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

SPECTROSCOPY OF MICROWAVE DISCHARGE AT CVD GROWTH OF SINGLE-CRYSTAL DIAMOND

It was investigated the possibility of optimizing the rapid growth of single-crystal diamond films obtained by vapor deposition (CVD). For this determined the temperature of the microwave discharge ($T\approx2200~K$) by optical pyrometry without using data emissivity.

Уникальные физические характеристики алмаза, делают его материалом с множеством различных применений. Однако наличие примесей и дефектов в природных алмазах стимулирует интенсивное развитие методов синтеза. В настоящее время существует два основных подхода к получению синтетических алмазов: метод высоких давлений и температур и методы химического осаждения из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition).

Среди множества развитых методов CVD технология газофазного синтеза из СВЧ-плазмы является самой "чистой" на сегодняшний день и позволяет добиться высоких скоростей роста [1]. Синтез монокристаллических алмазных пластин осуществлялся на установке УПСА100 (5 кВт, 2,45 ГГц) [2]. Параметры роста варьировались в диапазоне: $(0,5\div15\%)$ СН $_4$ /Н $_2$; общий расход газа $500\div1000$ см 3 /мин; СВЧ-мощность 1,7-2,5 кВт; рабочее давление 70-140 мм рт. ст.; температура подложки 800-1100°С, время осаждения от 30 минут до 100 часов. При

оптимально подобранных условиях скорость роста алмазной пленки достигает 60 мкм/ч [3]. Для увеличения скорости роста алмаза при сохранении совершенства кристалла необходимо оптимизировать параметры разряда и в частности знать параметры плазмы: ее состав, размеры и как основной параметр – температура плазменного облака.

Визуально плазменное облако по контуру выглядит желтым. Этот цвет обусловлен наличием микрочастиц углерода (сажи), которые дают нам непрерывный спектр излучения от плазмы [4]. Доказательством этого наличия в данном типе разряда являлось наблюдение осаждения слоя сажи на держатель образца. При этих параметрах разряда температура сажи будет равняться поступательной температуре газа. Для определения температуры плазменного облака применялся метод оптической пирометрии по спектру излучения [4]. Регистрация спектра излучения проводилась дифракционным спектрометром Ocean Optics HR4000. Сигнал для оптической спектроскопии собирался из цилиндрической области с диаметром 11 мм, пересекающей сферическое облако разряда по радиусу, ось которого отстоит от поверхности образца на 15 мм.

Спектр излучения СВЧ-разряда имеет схожую интенсивность с излучением черного тела, которое описывается формулой Планка. Это позволяет определить температуру газа по регистрируемому спектру.

Обработка полученного спектра и определение температуры проводилось следующим образом: а) регистрировался спектр излучения, с последующей корректировкой методом описанном в работе [1]; б) полученные данные представлялись в координатной плоскости ($X=C_2/\lambda$, $Y=\ln(\lambda^4/N)$, где: λ – длина волны, N – полное число электронов в каждой ячейке линейной ПЗС-матрице, $C_2=14388$ мкм·К), в которой планковская зависимость становится прямолинейной; в) температура определялась по наклону этой прямой.

Температура плазмы вычислена по участку спектра 480-580 нм и равна $T\approx2200\,$ К. Полученный результат хорошо согласуется с результатами описанными в работах [1, 4]. Измеренная температура плазмы позволяет воспроизводимо повторять условия для быстрого роста монокристаллической алмазной пленки.

- 1. Магунов А.Н. // ПТЭ. 2009. №4. С.5-28.
- 2. Большаков А.П., Ральченко В.Г., Польский А.В., Ашкинази Е.Е., Конов В.И. и др. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2012. Т.LVI. №1-2.
- 3. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Polskiy A.V., Konov V.I., et. al. // Plasma Phys. Rep. 2012, V.38, P.1113.
 - 4. Копьев В.А., Коссый И.А., Магунов А.Н., Тарасова Н.М. // ПТЭ. 2006. №4. С.131.

Ю.А. МИТЯГИН¹, Ю.А. КУЗИЩИН, В.И. КРИВЕНКОВ, С.А. САВИНОВ¹, К.И. КОЗЛОВСКИЙ. А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ И СПЕКТРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Проведены исследования мощности и спектрального состава терагерцового излучения, возбуждаемого посредством генерации импульсов тока излучением фемтосекундного лазера в фотопроводящих антеннах на основе GaAs. Спектры излучения измерялись фурье-спектрометром с пошаговым сканированием с использованием в качестве приемника излучения низкотемпературного германиевого болометра. Средняя мощность излучения достигала 1.0 мкВт, мощность в импульсе — 12 мВт, при квантовом выходе более 1%. Показано, что основная мощность излучения сконцентрирована в диапазоне 0.2 - 2 ТГц.

Yu.A. MITYAGIN¹, Yu.A. KUZISHCHIN, V.A. KRIVENKOV, S.A. SAVINOV¹, K.I. KOZLOVSKII, A.A. CHISTYAKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

¹Lebedev physical institute of the RAS, Moscow

THE STUDY OF POWER AND SPECTRUM OF THZ RADIATION PHOTOCONDUCTIVE DIODES BASED ON GaAs UNDER THE INFLUENCE OF FEMTOSECOND LASER

The power and the spectrum of THz radiation photoconductive diodes based on GaAs under influence of a femtosecond laser beam are studied. THz spectra are measured by a Fourier spectrometer with a step-scan. THz radiation is detection by a low temperature germanium bolometer. The average power of THz radiation is 1.0 uW, the power in one pulse is 12 mWt, quantum yield is more 1%. It is shown, the THz power is located in a spectral range from 0.2 to 2.0 THz.

Спектры терагерцового (ТГц) излучения исследуемых фотопроводящих антенн измерялись с помощью фурье-интерферометра «Grubb-ParsonsMK-3». Излучением фемтосекундного лазера (частота следования фемтосекундных импульсов 85 МГц) возбуждались токовые импульсы в фотопроводящей антенне, приводящие к испусканию импульсов ТГц излучения. Излучение лазера модулировалось прерывателем.

В качестве детектора излучения использовался охлаждаемый жидким гелием германиевый болометр фирмы «InfraredLabs». Диапазон спектральной чувствительности болометра — $0-300~{\rm cm}^{-1}~(0-10~{\rm T}\Gamma {\rm u})$, эквивалентная мощность шума — $5.3\cdot 10^{-13}~{\rm Bt/}\Gamma {\rm u}^{1/2}$, полоса частот $5-600~{\rm L}$. Сигнал с выхода предусилителя болометра детектировался синхронным детектором Unipan-232, оцифровывался аналого-цифровым преобразователем и в цифровом виде поступал в персональный компьютер. Обработка интерферограмм и восстановление спектра излучения посредством алгоритма быстрого преобразования Фурье.

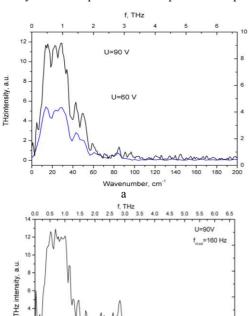


Рис. 1. Спектры терагерцового излучения $\Phi\Pi A$ Zomega, измеренные при различных напряжениях на антенне. Частота модуляции 70 Γ ц (а) и 160 Γ ц (б). Спектральное разрешение 2.5 см⁻¹

б

Wavenumber cm

Ha рис. 1а приведены спектры излучения фотопроводящей антенны Zomega при двух значениях напряжения, приложенного к антенне. Видно, излучение характеризуется непрерывным спектром, при ЭТОМ основная энергия излучения находится интервале 5 - 60 cm⁻¹ (0,15 - 2 $T\Gamma_{II}$).

Наблюдаемая в спектре структура обусловлена поглощением терагерцового излучения волее слабое терагерцовое излучение в области частот 80 - 90 см⁻¹ (2.4 - 2.7 ТГц).

При увеличении частоты модуляции до 160 Гц относительная интенсивность излучения в этой области возрастает (рис. 16).

Возможно, наблюдаемые изменения в спектре связаны с изменением теплового режима работы антенны.

О.Н. ШИШКАНОВ, А.П. БОЙЧЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

О ТОПОГРАФИИ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНОЙ ФОТОПЛЕНКЕ Agfa

С помощью отбеливателя, содержащего гексацианоферрат и бромид калия, на рентгеновской фотопленке Agfa F8-DNT-1200 исследована топография проявленных центров электрополевых изображений путем их оптической денситометрии. Выявлено влияние полярности напряжения на процесс их формирования в неоднородном электрическом поле.

O.N. SHISHKANOV, A.P. BOYCHENKO

Kuban state university, Krasnodar

ABOUT TOPOGRAPHY OPTICAL CENTERS FORMATION ELECTROFIELD IMAGES ON SILVER HALIDE FILM Agfa

With the help of a bleach containing gexacian of errat and bromide potassium, on a x-ray film Agfa F8-DNT-1200 the topography of the shown centers of the electrofield images is investigated by their optical density measure. Influence of polarity voltage on process of their formation in a non-uniform electrical field is revealed.

В нашей работе [1] был описан процесс кластеризации атомов серебра (Ag) под действием неоднородного электрического поля как в глубине фотоэмульсионных микрокристаллов (МК) его галогенидов (AgHal), так и на их поверхности, следствием чего служит формирование центров скрытых электрополевых изображений (ЭПИ). Из [1] также следует, что вклал образование ЭПИ вносит преимущественно В поверхностное Ад, из которого затем строится проявляемое изображение. Таким образом, оптическая плотность последнего может рассматриваться как совокупность глубинного и поверхностного ЭПИ. Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке высказанного предположения разделения изображений путем химического на перечисленные составляющие с помощью отбеливателя на основе красной кровяной соли $(K_3[Fe(CN)_6])$ в сочетании с бромидом калия (KBr). Исследуемым фотоматериалом являлась рентгеновская фотопленка Agfa F8-DNT-1200.

Ее электрополевая экспозиция проводилась разнополярными импульсами напряжения $1\ kV$ и длительностью $0,1\ s$ на описанной в [2]

установке. После чего образцы фотопленки обрабатывались при 295 К в течение 300 s в отбеливателе с различным сочетанием $K_3[Fe(CN)_6]$ и КВг, а затем — в проявителе ТУ-1709. Результаты денситометрии, оценки радиальной r оптической плотности D_i ЭПИ полусферического электрода обрабатывались с помощью программы MathCAD, которые приведены на рис. 1. Здесь 1 — контрольный вариант (без отбелки ЭПИ); 2 — отбеливатель, содержащий 60 g/l $K_3[Fe(CN)_6]$; 3 — 30 g/l $K_3[Fe(CN)_6]$ и 15 g/l KBr; 4 — 30 g/l $K_3[Fe(CN)_6]$ и 30 g/l KBr.

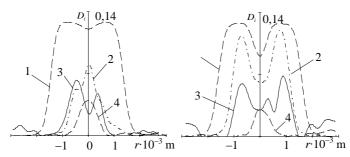


Рис. 1. Радиальное распределение оптической плотности ЭПИ при отрицательной (слева) и положительной (справа) полярностях полусферического электрода

графиков рисунка видны характерные особенности полученные при разнополярном напряжении, что четко выявляется с помощью отбеливателя. Результат существенных различий его действия в отсутствии КВг указывает на преимущественное формирование Адцентров в глубине МК AgHal для «положительных» ЭПИ, *D*; которых превышает «отрицательные» более чем в 2 раза. Отсутствие таких различий для отбеливателя с КВг (особенно для варианта 4) говорит о формировании на МК защитного слоя из AgBr, препятствующего проникновению K₃[Fe(CN)₆] вглубь кристалликов и разрушению Ag-ЭПИ. центров Таким образом, удалось выявить топографию формирования последних, определяющих и их оптические свойства.

- 1. Шишканов О.Н., Бойченко А.П. Кинетическая модель коалесценции атомов серебра в микрокристаллах его галогенидов под действием электрического поля // Фундаментальные исследования. 2014. № 8, Ч.3. С.607–613.
- 2. Шишканов О.Н., Бойченко А.П. Электрополевая чувствительность галогенсеребряной пленки Agfa // Сб. науч. трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С.240–241.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН 1

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана ¹OAO «Швабе-Фотоприбор», Москва

ВОЗМОЖНОСТИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ В УХУДШЕННЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрены возможности активно-импульсных приборов ночного видения при их применении ночью для наблюдения в условиях пониженной прозрачности атмосферы (туман, дождь, снегопад). Представлены расчетные и экспериментальные данные для указанных условий наблюдения.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN¹

Bauman Moscow state technical university ¹OJSE «Shvabe-Photodevice», Moscow

THE ABILITY TO ACTIVELY PULSE OF NIGHT VISION DEVICES WHEN OPERATING IN DEGRADED CONDITIONS OF OBSERVATION

Considered to be actively pulse of night vision devices when they are applied at night for observation under conditions of reduced transparency of the atmosphere (fog, rain, snow). The calculated and experimental data for the specified observation conditions.

Активно-импульсные приборы ночного видения (АИ ПНВ) характеризуются способностью обеспечить видение при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад, и др.) [1, 2]. Рассмотрим конкретные возможности обеспечения видения в таких условиях. При работе в тумане (та ≤0,5) пассивные ПНВ вообще не работают. При работе по ростовой фигуре человека при нормальной прозрачности атмосферы АИ ПНВ обеспечивает дальность распознавания 0.5 - 1 км, а пассивные ПНВ того же класса в тех же условиях - не более 0,3пониженной прозрачности атмосферы KM. При ΑИ эффективнее пассивного в 5 раз. На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов по методике работ [1, 2] и соответствующие экспериментальные данные в виде значков. На рис. 1 и 2 видно их хорошее совпадение. Таким образом, АИ ПНВ являются надежным средством технического видения при наблюдении в условиях пониженной прозрачности атмосферы.

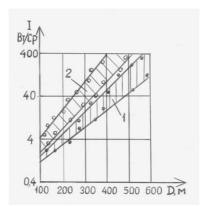


Рис. 1. Результаты расчетов и экспериментальные данные зависимости средней энергетической силы света I лазерного осветителя от дальности распознавания D при наблюдении в АИ ПНВ ростовой фигуры человека в условиях снегопада (семейство кривых 1, $\tau_a = 0,5$) и в условиях тумана (семейство кривых 2, $\tau_a = 0,2$)

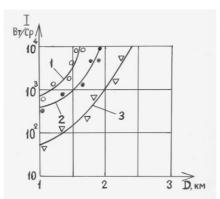


Рис. 2. Результаты расчетов и экспериментальные данные зависимости средней энергетической силы света лазерного осветителя от дальности распознавания при наблюдении в АИ ПНВ грузовой автомашины (борт) в условиях тумана (кривая 1, $\tau_a = 0.4$), дымки (кривая 2, $\tau_a = 0.6$) и при нормальной прозрачности атмосферы (кривая 3, $\tau_a = 0.85$)

- 1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999.
 - 2. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М., Новости, 2000.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН 1

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана ^{1}OAO «Швабе-Фотоприбор», Москва

БИНОКУЛЯРНЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Рассмотрены бинокулярные телевизионные очки ночного видения, для круглосуточного наблюдения и дистанционной передачи изображения. Представлены их параметры.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN¹

Bauman Moscow state technical university

OJSE «Shvabe-Photodevice». Moscow

BINOCULAR TELEVISION NIGHT VISION GOGGLES

Considered binocular television night vision goggles, surveillance and remote imaging. Represented by their parameters.

В настоящее время широко применяются бинокулярные очки ночного видения (ОНВ). Они состоят из 2-х идентичных каналов, каждый из которых содержит объектив, электронно-оптический преобразователь (ЭОП) и окуляр [1]. Однако такие ОНВ не обеспечивают круглосуточной и всепогодной работы, не позволяют дистанционно передать изображение и подвергнуть его цифровой обработке, запомнить, тиражировать и дублировать его, хотя и обладают минимальной стоимостью.

Для преодоления указанных недостатков рекомендуются схема бинокулярные телевизионные (ТВ) ОНВ. Их схема, представленная на рис. 1, состоит из 2-х низкоуровневых ТВ каналов. В широкопольном канале 1 ОНВ установлен объектив 3 с фокусным расстоянием f=10 мм, относительным отверстием O=1:1,4 и углом поля зрения $2\omega=100^\circ$. В узкопольном канале 2 установлен объектив с f=25 мм, O=1:1,4 и $2\omega=40^\circ$ 1-й ЭОП 4 и 2-й ЭОП 10- поколения 3. Экран каждого из ЭОП 4 и 10 с помощью 1-го фокона 5 и соответственно 2-го фокона 11 оптически сопряжен с матрицей ПЗС 1-й ТВ камеры 6 и 2-й ТВ камеры 12. выход 1-й ТВ камеры 6 и 2-й ТВ монитору 7 и 2-му ТВ монитору 13 соответственно. На экран 1-го ТВ монитора 13 сфокусирован 1-й окуляр 14. Окуляр 14 имеет 15 15 имеет 15 15 мм, линейное поле зрения

21 = 17.5 мм. Окуляр 14 имеет f = 25 мм. 21 = 17.5 мм. У обоих окуляров диаметр выходного зрачка 10 мм при его удалении 20 мм. Увеличение обоих каналов 1^x . Для канала $1 2\omega = 100^\circ$ (по диагонали), дальность обнаружения ночью ростовой фигуры человека (РФЧ) 200 м. Для канала 2 $2\omega = 40^{\circ}$ (по диагонали), дальность распознавания ночью РФЧ 200 м. ТВ мониторы 7 и 13 выполнены на основе жидкокристаллических дисплеев с диагональю 17.5 мм. работающих в зеленой области спектра. Масса ТВ ОНВ – около 600 г. В ТВ каналах используется цифровая обработка изображения в реальном масштабе времени. ТВ изображение может быть помощью соответствующего интерфейса введено в карманный или в персональный компьютер (ПК) для запоминания и тиражирования. С помощью дополнительного радиопередатчика. ТВ изображение может быть передано дистанционно и (или) введено в ТВ монитор другого обеспечивают оператора. TB OHB возможность круглосуточного наблюдения и дистанционную передачу изображения.

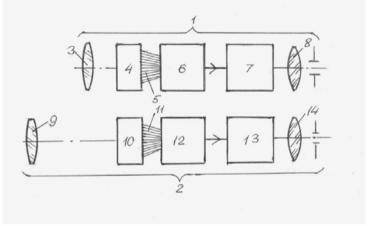


Рис. 1. Схема бинокулярных телевизионных ОНВ

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М., Новости, 2000.

Д.С. АНДРЕЕВ, А.К. БУДТОЛАЕВ, А.К. БУДТОЛАЕВА, П.Е. ХАКУАШЕВ, И.В. ЧИНАРЕВА

ОАО «НПО «Орион», Москва

МИНИМИЗАЦИЯ ЕМКОСТИ PIN-ФОТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaAs/InP

Работа посвящена актуальной проблеме минимизации удельной емкости ріпфотодиодов на основе гетероструктуры InGaAs/InP. Исследованы и выявлены причины появления повышенной емкости, связанные с аномальной диффузией серы из подложки InP и разработаны меры по их устранению.

D.S. ANDREEV, A.K. BUDTOLAEV, A.K. BUDTOLAEVA, P.E. KHAKUASHEV, I.V. CHINAREVA

Orion research and production association, Moscow

MINIMIZING THE CAPACITANCE OF PIN-PHOTODIODES BASED ON HETEROEPITAXIAL STRUCTURE OF InGaAs/InP

The paper is devoted to the actual problem of minimizing the specific capacitance pin-photodiodes based heteroepitaxial structures InGaAs/InP. Researched and identified the causes of increased capacity associated with anomalous diffusion of sulfur from the InP substrate and develop measures to eliminate them.

Одной из важных задач при производстве быстродействующих, InGaAs/InP pin-фотодиодов обеспечение малошумящих является минимальной емкости при заданном рабочем напряжении и площади фоточувствительной площадки [1]. Ha первом этапе исследовались образцы гетероструктур n-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/n+-InP, выращенные MOC-гидридной эпитаксией при температуре 620-650°C на подложках n-InP, легированных серой. На этой структуре был изготовлен ріп-фотодиод (ФД) с использованием диффузии кадмия при температуре 575°C с целью создания p-n-перехода в поглощающей области InGaAs. Распределение атомов серы по толщине исследовалось непосредственно после эпитаксиального выращивания (рис. 1) и после диффузионного процесса примеси (рис. 2). По результатам CV-измерений p-n-перехода был рассчитан профиль распределения концентрации носителей в глубине структуры вплоть до подложки n+-InP (рис. 3).

Из сравнения рис. 1, 2 и 3 видно, что процесс диффузии кадмия сопровождается аномальной диффузией серы из высоколегированной

подложки InP в эпитаксиальный слой InGaAs. Аналогичные явления наблюдаются при легировании других эпитаксиальных структур [2, 3]. Именно это явление вызывает увеличение емкости.

На втором этапе работы толщина поглощающей области InGaAs была увеличена на глубину проникновения серы в этот слой. На этих структурах по той же технологии были изготовлены ріп-фотодиоды. Были измерены значение емкости на годных по темновым токам кристаллах (рис. 4). В результате, на структурах с толщиной активного слоя InGaAs 3,7 мкм 99% ФД имели требуемую емкость С<1,5 пФ (при 5В). Для сравнения, на структурах с толщиной слоя 3,3 мкм только 44% диодов имели такую же емкость. Проведенные исследования использованы для повышения процента годных фотоприемных устройств с высокой чувствительностью к коротким по длительности импульсам и большим динамическим диапазоном входных мощностей, чувствительных в спектральном диапазоне 1,0 -1,6 мкм.

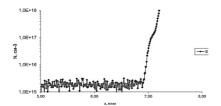


Рис. 1. Распределение атомов серы непосредственно после эпитаксии

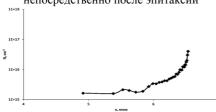


Рис. 3. Профиль распределения концентрации носителей в глубине структуры

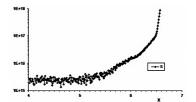


Рис. 2. Распределение атомов серы после процесса диффузии кадмия

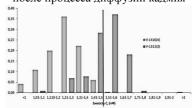


Рис. 4. Результаты контроля емкости pin-ФД на стандартных и усовершенствованных структурах

- 1. Техника оптической связи. Фотоприемники / под ред. У. Тсанга. М.: Мир. 1988. С.526.
- 2. Si S.K., Yeo D.H., Yoon K.H., Kim S.J. // IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics, 1998, V.4, No.4, P.619.
- 3. Holonyak N.Jr., Fellow L. // IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics. 1998. V.4. No.4. P.584.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН 1

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана ¹OAO «Швабе-Фотоприбор», Москва

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ С КОАКСИАЛЬНЫМ ОБЪЕКТИВОМ

Рассматриваются псевдобинокулярные очки ночного видения с коаксиальным объективом, обеспечивающим два поля зрения.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN¹

Bauman Moscow state technical university ¹OJSE «Shvabe-Photodevice», Moscow

PSEUDONOCARDIA NIGHT VISION GOGGLES WITH COAXIAL LENS

Considered pseudonocardia night vision goggles with coaxial lens, providing two fields of view.

Для расширения поисковых возможностей псевдобинокулярных очков ночного видения (ОНВ) [1] рекомендуется их схема с коаксиальным объективом (см. рис. 1). Объектив 1 имеет фокусное расстояние f' = 18,76 мм, угол поля зрения $2\omega = 50^{\circ}$, относительное отверстие O = 1:1,4. В центральной части объектива 1 выполнено отверстие, в которое вставлен объектив 2 с f' = 7,34 мм, $2\omega = 100^{\circ}$, O = 1:1,4. Перед объективами установлена регулируемая ирисовая диафрагма 3. Оба объектива 1, 2 сфокусированы на фотокатод ЭОП 4. На его экран сфокусирована окулярная система 5. При работе объектива 1 у OHB $2\omega = 50^{\circ}$. При этом увеличение окулярной системы 5 составляет $\Gamma = 13.326^{x}$, а ее линейное поле зрения 21 = 17,5 мм. При работе объектива 2 (входной зрачок объектива 1 перекрыт при этом диафрагмой 3) у ОНВ 2 ω = 100°. Дальность распознавания ростовой фигуры человека (РФЧ) ночью в нормированных условиях при $2\omega = 50^{\circ}$ составляет 200 м, а при $2\omega = 100^{\circ}$ дальность обнаружения РФЧ также составляет 200 м, а ее распознавания – 150 м. При этом окулярная система 5 имеет $\Gamma = 34^x$ при том же 21. Для изменения Г системы 5 служит ее линзовый компонент 6 с переменным Г. Управление им и диаметром ирисовой диафрагмы 3 осуществляется с помощью электромеханического блока 7. Конечно, можно при работе объектива 2 не менять Г окулярной системы 5 для ее упрощения. Но тогда увеличение ОНВ окажется равным не 1^x , а 0.39^x . Расстояние по базе глаз окулярной системы регулируется в пределах 57 – 78 мм. Для всепогодной и круглосуточной работы схема ОНВ дополнена тепловизионным (ТВП) каналом. Его ИК-объектив 8 оптически сопряжен с ТВП модулем 9 и сфокусирован на матрицу микроболометров 10. Сигнал с ее выхода обрабатывается в электронном блоке 11, а на OLED дисплее 12 представляется изображение, которое с помощью линзового компонента 13 через полупрозрачное зеркало 14 оптически сопряжено с окулярной системой 5 и вводится в ее левый канал. ТВП канал работает в области спектра 8 – 12 мкм, имеет дальность распознавания РФЧ 300 м, $2\omega =$ $8x12^{\circ}$, $\Gamma = 1^{x}$. На выходе полупрозрачного зеркала 14 установлен ТВ канал. Его объектив 15 сфокусирован на матрицу ПЗС ТВ камеры 16. Благодаря этому изображение с экрана ЭОП 4 и с OLED дисплея 12 вводится в ТВ канал. Это позволяет передать изображение дистанционно (если дополнительно использовать радиорелейный канал связи) или может быть введено в персональный компьютер с целью запоминания изображения, его цифровой обработки и тиражирования. Питание ОНВ обеспечивается от аккумуляторной батареи с напряжением 9 В. Масса ОНВ составляет 600 г.

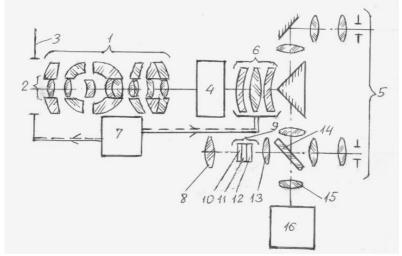


Рис. 1. Схема построения псевдобинокулярных ОНВ с коаксиальным объективом

Список литературы
1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М., Новости, 2000.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН 1

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана ¹OAO «Швабе-Фотоприбор», Москва

АСИММЕТРИЧНЫЕ ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИЛЕНИЯ

Рассмотрены очки ночного видения, выполненные по асимметричной схеме для оптимизации их стыковки с тепловизионным и телевизионным каналами с целью круглосуточного и всепогодного видения.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN¹

Bauman Moscow state technical university ¹OJSE «Shvabe-Photodevice». Moscow

ASYMMETRIC PSEUDONOCARDIA NIGHT VISION GOGGLES

Considered night vision goggles, made by asymmetric scheme to optimize their coupling with thermal imaging and TV channels with all-purpose, all-weather vision.

настоящее технике время широко псевдобинокулярные очки ночного видения ОНВ, выполненные по классической симметричной схеме: объектив, электронно-оптический преобразователь (ЭОП) и окулярная система с разводкой изображения с экрана ЭОП на два глаза [1]. Такие ОНВ не обладали круглосуточностью и всепогодностью работы. В связи с этим были разработаны асимметричные псевдобинокулярные ОНВ, схема которых дана на рис. 1. В ОНВ объектив 1 сфокусирован на фотокатод диаметром 17,5 мм ЭОП 2. Изображение с его экрана через гипотенузную светоделительную грань 4 1-й куб-призмы 3 оптически сопряжено с 1-м окуляром 5. Благодаря гипотенузной грани 4 1-й куб-призмы 3 изображение с экрана ЭОП 2 передается также через 1-е плоское зеркало 6 в линзовую оборачивающую систему 7. Она оборачивает изображение, затем через 2-е плоское зеркало 8 и гипотенузную грань 10 2-й куб-призмы 9 передает его во 2-й окуляр Линзовый объектив 1 имеет фокусное расстояние 7,34 мм, относительное отверстие 1:1,4, угол поля зрения 100°. Окуляры 5, 11 имеют увеличение $12,5^x$, линейное поле зрения 17,5 мм, диаметр выходного зрачка 10 мм при его удалении 20 мм. Увеличение ОНВ составляет 0,3^x при угле поля зрения 100° и дальности обнаружения РФЧ в нормированных условиях, равной 200 м. Благодаря такой схеме в ОНВ удобно встроить тепловизионный (ТВП) и ТВ каналы. ТВП канал обеспечивает круглосуточное и всепогодное наблюдение, а ТВ канал – круглосуточное наблюдение и дистанционную передачу изображения. ИК-объектив 12 сфокусирован на тепловизионный модуль 13. Изображение с его ОLED дисплея через куб-призму 9 передается во 2-й окуляр 11. Изображение с экрана ЭОП 2 и с ОLED дисплея модуля 13 переносится с помощью объектива 14 на матрицу ПЗС ТВ камеры 15. ТВП канал работает в области спектра 8 – 12 мкм, имеет дальность распознавания ростовой фигуры человека 300 м, угол поля зрения 8х12°, увеличение 1^х. Питание ОНВ обеспечивается от аккумуляторных батарей с напряжением 9 В. Масса ОНВ не превышает 650 г. База глаз регулируется в пределах 57 – 78 мм. Такие ОНВ найдут широкое применение для охранных ведомств, служб МЧС и др.

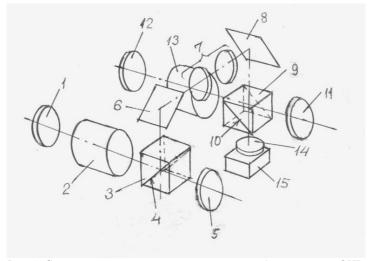


Рис. 1. Схема построения асимметричных псевдобинокулярных ОНВ

Список литературы 1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М., Новости, 2000.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.А. ТАСКИНА, Н.В. ТРЕГУБ, Е.А. СЕЛЕЗНЕВА

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕГАЗАЦИИ ВОДОРОДА В ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Представлены результаты исследований водородной дегазации в г. Самаре с помощью методов спектроскопии комбинационного рассеяния и конфокальной флуоресцентной микроскопии. Получены особенности спектра комбинационного рассеяния растений, произрастающих в зонах разлома и вне разлома. Основные изменения были зарегистрированы на волновых числах 1326 см⁻¹, 1296 см⁻¹, 1380 см⁻¹, что связано с содержанием алкалоидов, хлорофилла и целлюлозы в листьях растений. На основе введенного оптического коэффициента было проведено картографирование Самарской области.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.A. TASKINA, N.V. TREGUB, E.A. SELEZNEVA

S.P. Korolyov Samara state aerospace university

OPTICAL METHODS FOR MEASURING DE-GASSING OF HYDROGEN IN CITIES

The results of studies of hydrogen degassing in Samara by using Raman spectroscopy and confocal fluorescence microscopy. Derived features of the Raman spectrum of plants grown in the fault zones and outside the fault. Main changes were registered at wavenumbers 1326 cm-1, 1296 cm-1, 1380 cm-1, due to the content of alkaloids, cellulose and chlorophyll in leaves. Through the introduction of optical coefficient was conducted mapping of the Samara region.

Одним из факторов, осложняющим экологическую обстановку, является дегазация земли. Повышенное содержание водорода вблизи несущих металлических конструкций может снижать их прочность в результате охрупчивания [1]. В связи с этим, актуален вопрос об исследовании концентрации водорода в почве, а также его влиянии на живые организмы. Однако, выход глубинного водорода имеет залповый характер. Данную проблему можно решить, используя в качестве локальных интегральных индикаторов растительные биообъекты [2].

На наличие зон дегазации были исследованы 22 зоны на территории города Самары и Самарской области. С каждой зоны отбиралось по 10 объектов, расположенных на расстоянии 500 метров друг от друга. Статистический разброс оптических параметров биообъектов не превышал 14%. Параллельно контролировались освещенность, влажность и кислотность почвы в исследуемых зонах.

В качестве основных оптических методов были использованы методы спектроскопии комбинационного рассеяния и конфокальной флуоресцентной микроскопии [3]. Метод конфокальной микроскопии позволил проводить детальный анализ структурных изменений в клетках растения при действии водорода.

Метод комбинационного рассеяния был реализован с помощью экспериментального стенда, включающим в себя источник излучения (лазер на длине волны 785нм с регулируемой мощностью до 500мВт), волоконную систему сбора и подачи излучения, и спектрофотометр SR-303i с интегрированной цифровой камерой ANDOR DV-420A-OE (1024*256). Погрешность метода не превышала 5%.

В результате проведенных исследований:

- 1) Получены особенности спектра комбинационного рассеяния растений, произрастающих в зонах разлома и вне разлома. Основные изменения были зарегистрированы на волновых числах $1326~{\rm cm}^{-1}$, $1296~{\rm cm}^{-1}$, $1380~{\rm cm}^{-1}$, что связано с содержанием алкалоидов, хлорофилла и целлюлозы в растениях;
- 2) С помощью метода конфокальной флуоресцентной микроскопии показано увеличение хлоропластов в листьях растений при действии водорода;
- 3) Введен оптический коэффициент пропорциональный наличию глубинного выхода водорода из разломов Земной коры, определяемый как отношение значений интенсивностей комбинационного рассеяния на волновых числах 1380см⁻¹ и 1600см⁻¹. На основе данного коэффициента было проведено картографирование Самарской области.

- 1. Рудник В.А. Влияние зон геологической неоднородности земли на среду обитания // Вестник Российской Академии Наук, 1996. Т.66. №8. С.713-719.
- 2. Пестова Л.В., Рязанцева О.В.. Биоиндикация автотранспортного загрязнения городских территорий // Ползуновский вестник. 2004. №2. С.87-94.
- 3. Timchenko E.V., Timchenko P.E. Tregub N.V., Taskina L.A., Selezneva E.A. Optical methods for control of hydrogen influence on plants // Proc. SPIE. 2014. V.9221. P.922114.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.А. ТАСКИНА, Л.Т. ВОЛОВА 1 , Ю.В. ПОНОМАРЕВА 1

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва

¹Самарский государственный медицинский университет

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ КОСТНОЙ ТКАНИ

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.A. TASKINA, L.T. VOLOVA¹, U.V. PONOMAREVA¹

S.P. Korolyov Samara state aerospace university
¹Samara state medical university

OPTICAL METHODS FOR STUDY OF THE DEMINERALIZATION INFLUENCE ON THE ORGANIC AND MINERAL STRUCTURE OF BONE TISSUE

The results of experimental research of hydroxyapatite and samples of various types of human bone tissue depending on demineralization time were represented using Raman spectroscopy. Using scanning electron microscopy, the structural changes in bone tissue depending on t_D were studied. Raman spectra of the cortical and cancellous samples of human bone tissue depending on t_D were obtained. The ratio of the mineral $(PO_4^{\ 3})$ and organic components (amide I) of bone tissue, content of $CO_3^{\ 2}$, as well as changes in the spectral regions responsible for the structural integrity of the collagen fibers in bone tissue $(1200\text{-}1460\ \text{cm}^{-1}\ \text{and}\ 2880\text{-}3000\ \text{cm}^{-1})$ were investigated.

Важным этапом получения костного биоматериала для замещения дефектов костной ткани является процесс деминерализации — обработка в кислотном растворе, которая приводит к потере большей части минеральных компонент, при этом сохраняется доля коллагена и белков, необходимых для регенерации [1]. Доказано, что скорость восстановления кости выше при трансплантации частично деминерализованного биоматериала [2]. В свою очередь, правильно подобранная степень деминерализации обеспечивает идеальное сочетание остеоиндуктивных и остеокондуктивных свойств для успешной регенерации костной ткани.

В данной работе метод спектроскопии комбинационного рассеяния света использован как эффективный метод исследования минеральной составляющей костного биоматериала. Изменение минерального состава исследованных образцов параллельно контролировалось с помощью растровой электронной микроскопии.

В качестве объектов исследования были использованы 36 и 39 образцов трёхмерного материала твёрдой кортикальной и спонгиозной костной ткани серии «Лиопласт» (ТУ-9398-001-01963143-2004). Для получения деминерализованного биоматериала костную ткань помещали в HCl раствор 1,2 нормальности.

Спектральные характеристики образцов изучались с помощью экспериментального стенда, включающего в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i с охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (длина волны 785 нм).

В результате, получены спектры КР для костного биоматериала человека с разной степенью деминерализации. Показано, что процесс деминерализации может количественно контролироваться с использованием отношения PO_4^{3-} и амид I, а также соотношения CO_3^{2-} замещения В- и А-типа. Исследованы спектральные особенности коллагена костной ткани в зависимости от t_D на основе анализа областей спектра $1200-1460~{\rm cm}^{-1}$ и $2880-3000~{\rm cm}^{-1}$. Полученные с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния результаты изменения содержания минеральных компонент со временем деминерализации сопоставлены с результатами растровой электронной микроскопии.

- 1. Тимченко П.Е., Захаров В.П., Волова Л.Т., Болтовская В.В., Тимченко Е.В. Микроскопический контроль процесса остеоинтеграции имплантатов // Компьютерная оптика. 2011. Т.35. №2. С.183-187.
- 2. West P.A., Torzilli P.A., Chen C., Lin P., Camacho N.P. $/\!/$ Journal of Biomedical Optics. 2005. V.10(1). P.014015.

А.Н. МАЛОВ, А.А. ВАЙЧАС¹, Е.А. НОВИКОВА

Иркутский государственный медицинский университет ¹Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС РОСТА ЖЕЛЧНЫХ КАМНЕЙ

Исследовано влияние лазерного излучения на процесс формирования кристаллов в препаратах желчи. Показано, что облучение белой желчи лазерным излучением качественно влияет на протекающие в ней процессы кристаллизации.

A.N. MALOV, A.A. VAYCHAS¹, E.A. NOVIKOVA

Irkutsk state medical university

¹Irkutsk branch of Moscow state technical university of civil aviation

LASER RADIATION ACTION ON BILIOUS STONES GROWTH PROCESS

Influence of laser radiation on process of crystals in bile preparations formation is investigated. It is shown, that the irradiation of white bile by laser radiation qualitatively influences crystallization processes proceeding in it.

В [1] было показано, что на динамику студенения и структуру гельколлоидных систем можно влиять ИК-лазерным облучением. В [2] было установлено, что облучение лазерным излучением уменьшает размеры кластеров в водных растворах биоорганических веществ, что приводит к уменьшению кристаллических зародышей при формировании пленок из этих растворов. С другой стороны, за последние 40 лет заболеваемость желчнокаменной болезнью удваивалась каждые 10 лет; при этом механизм образования желчных камней недостаточно изучен [3].

Поэтому изучение физико-химических основ зарождения камня в и гелеобразных средах, также поиск a предупреждения его образования является на данный момент актуальной залачей. Олними ИЗ перспективных способов влияния камнеобразование представляются технологии лазерной нанокластеризации.

Таким образом, цель данной работы – исследование влияния лазерного излучения на процесс формирования кристаллических зародышей в

препарате человеческой желчи методом выращивания желчных кристаллов в кварцевых кюветах.

Для проведения эксперимента использовались препараты белой желчи, лишенной пигмента, желчных камней, изъятые после холецистэктомии при водянке желчного пузыря; натуральной желчи, желчных камней после холецистэктомии при холецистите.

Исследовались три опытных образца (желчные камни) каждого препарата: контрольный образец; образец, находящийся в желчи; образец, находящийся в желчи, облучаемой лазером (длина волны 532 нм, мощность 30 мВт, диаметр пучка 5 мм). В эксперименте лазерное излучение направлялось в кювету, при прохождении через матовую стенку которой рассеивалось и воздействовало на желчь с находящимся в ней образцом. Облучение производилось ежедневно в течение 5 минут. Эксперимент продолжался 65 дней и был закончен в виду испарения желчи из кюветы.

В результате проведенного эксперимента, было установлено, что в случае препаратов из натуральной желчи, не было замечено сколь-нибудь качественных отличий ни в остатках желчи в кюветах, ни в образцах, находящихся в ней во время эксперимента. Исследуемые образцы были идентичны контрольному.

В случае препаратов белой желчи, качественные изменения и отличия были видны невооруженным взглядом. Так, в кювете, не облучаемой лазером, образовались кристаллы, а в кювете, облучаемой лазером, осталась однородная вязкая коллоидная жидкость. Установлено отличие камней по однородности налета. Желчный камень, находившийся в облучаемой лазером желчи, имел равномерно распределенный по всему камню белый налет без дефектов его поверхности, чего нельзя сказать о камне, находившимся в желчи, не подвергавшейся воздействию лазерного излучения.

Таким образом, рост желчного камня в белой желчи происходит быстрее, чем в препарате натуральной желчи с пигментом.

- 1. Malov A.N., Seteikin A.Yu., et al. The laser radiation action on the biological objects // Optik. 2013. V.124. P.6034- 6041.
- 2. Малов А.Н., Мусатова Е.С., Сетейкин А.Ю. Исследование особенностей зародышеобразования при планарной кристаллизации биоорганических растворов на твердой подложке // Вестник Амурского гос. ун-та. 2012. Вып. 57. С.39-44.
- 3. Малов А.Н., Новикова Е.А. Воздействие на процесс формирования зародышей желчных камней лазерным излучением // в кн.: «VI Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине». Троицк: ИПЛИТ РАН, ИС РАН, ТНЦ РАН. 2014. С.51-53.

M.C. 3AXAPOB¹, C.M. 3AXAPOB

Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука, Москва ¹3AO «Сбербанк – Технологии», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММ СЕРДЕЧНОГО РИТМА МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

В работе исследована эффективность использования различных типов вейвлетов при нестационарном спектральном анализе фотоплетизмограмм сердечного ритма. Плетизмограммы снимались с большого пальца пациента с помощью устройства «Биомышь», представлявшую собой оптоэлектронную пару, вмонтированную в компьютерную мышь. Длительность регистрации сигнала соответствовала приблизительно ста сердечным циклам. Для вейвлетов использовались четыре типа базисных материнских функций, две из которых являлись вещественными (Wave-wavelets, Mhat-wavelets), а две — комплексными (Morlet-wavelets, Rectangular-wavelets). Обсуждается преимущество вейвлета Rectangular для нестационарного спектрального анализа сердечного ритма.

M.S. ZAKHAROV, S.M. ZAKHAROV

Institute of electronic controlling computers, Moscow

¹ JSC «Sberbank-technology», Moscow

INVESTIGATION OF HEART RATE PHOTOPLETHYSMOGRAM BY THE WAVELET ANALYSIS

The efficiency of different types of wavelets under nonstationarity photoplethysmogram spectral analysis of heart rate was studied. Plethysmograms indicated with the thumb of the patient by using a "Biomouse" device represent optoelectronic pair built-in a computer mouse. Duration of the signal registration was approximately one hundred cardiac cycles. Four types of basic maternal functions were used for, two of which being real (Wave, Mhat wavelets), and two – complex (Morlet, Rectangular wavelets). The advantage of the wavelet Rectangular for transient spectral analysis of heart rate is discussed.

Спектральные методы исследования давно проникли в кардиологию и традиционно составляют основу метода вариабельности сердечного ритма. Данный метод получил широкое распространение в донозологической диагностике функционального состояния организма на грани нормы и патологии. Спектральный фурье-анализ кардиоинтервалов позволяет судить об адаптационных возможностях организма и состоянии вегетативной нервной системы.

Вейвлет-преобразования играют роль непрерывного интегрального преобразования сигнальной функции x(t) с базисным ядром [1-3]. Для наших целей они примут вид:

$$\begin{split} W_{1}(t,f) &= -\int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau) \sqrt{f} \, (f\tau) \exp(-\frac{f^{2}\tau^{2}}{2}) d\tau, \\ W_{2}(t,f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau) \sqrt{f} \, (1-f^{2}\tau^{2}) \exp(-\frac{f^{2}\tau^{2}}{2}) d\tau, \\ W_{3}(t,f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau) \sqrt{f} \, \exp(2\pi i f\tau - \frac{f^{2}\tau^{2}}{2k^{2}}) d\tau, \\ W_{4}(t,f) &= \int_{-\infty}^{\frac{k}{2f}} x(t+\tau) \sqrt{f} \, \exp(2\pi i f\tau) d\tau. \\ &- \frac{k}{2f} \end{split}$$

Выбор анализирующего вейвлета, как правило, определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала. От этого зависит разрешение как по времени, так и по частоте. Это напрямую связано с шириной используемого вейвлета в реальном и Фурье-пространстве. Например, ширины Wave и Mhat вейвлетов (1,2) в реальном временном и частотном пространствах однозначно связаны между собой $(\Delta T \sim f^1 \Delta f \sim f)$. Поскольку нас интересуют в основном спектральные свойства фотоплетизмограмм сердечного ритма, то желательно иметь возможность лучшего частотного разрешения. Для вейвлетов Морле и прямоугольной формы (3,4) имеется важный «управляющий параметр» k, от которого зависит длительность временного окна и вместе с тем спектрального разрешения $(\Delta T \sim k/f \Delta f \sim f/k)$. Так, для улучшения спектрального разрешения в последних двух вейвлетах следует выбирать k > 1.

Из рассмотренных четырех типов вейвлетов (Wave, Mhat, Morlet и Rectangular) с точки зрения исследования спектральных свойств фотоплетизмограмм наиболее предпочтительным оказывается использование вейвлета прямоугольной формы. Данный вейвлет является аналогом фурье-преобразования «оконного типа» со спектральным разрешением, зависящим от частоты ($\Delta f \sim f/k$), и обладает лучшим спектральным разрешением по сравнению с остальными типами вейвлетов, включая вейвлет Морле.

- 1. Астафьева Н.М. // Успехи физических наук. 1996. Т.166(11). С.1145-1170.
- 2. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. // Успехи физических наук. 2001. Т.171(5). С.465-501.
 - 3. Захаров С.М. // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. №11. С.43-48.

$P.B. POMAШKO^{1,2}, M.H. БЕЗРУК^1, С.А. ЕРМОЛАЕВ^1$

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

ГИДРОФОН НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Разработан и исследован волоконно-оптический гидрофон на основе адаптивного интерферометра. Определены характеристики гидрофона.

R.V. ROMASHKO^{1,2}, M.N. BEZRUK¹, S.A. ERMOLAEV¹

¹Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok ²Far-Eastern federal university, Vladivostok

THE HYDROPHONE IS AN ADAPTIVE OPTICAL FIBER INTERFEROMETER

Fiber-optical hydrophone based on adaptive interferometer is developed and investigated. Parameters of the hydrophone are defined.

В настоящей работе разработан и экспериментально исследован гидрофон на основе адаптивного волоконно-оптического интерферометра (рис. 1). Чувствительным элементом гидрофона является волоконно-оптический модуль, который представляет собой металлическую решетку-каркас и уложенный на него витками (число витков 10) многомодовый волоконный световод (рис. 2). В качестве системы обработки сигнала приемного волоконно-оптического модуля гидрофона является адаптивный интерферометр на основе динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле CdTe [1].

В качестве испытательного стенда использован бассейн, выполненный размерами 100х50х52 наполненный оргстекла с CM, Акустические бассейне возбуждались волны помошью пьезоэлектрического излучателя, на который подавался переменный синусоидальный сигнал с генератора электрических сигналов резонансной частоте излучателя (39 кГц). При этом приемный модуль и излучатель располагались В бассейне одном уровне на противоположных стенок.

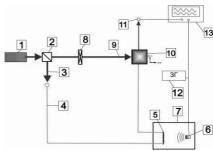


Рис. 1. Схема экспериментальной установки волоконно-оптического гидрофона: 1 - непрерывный лазер (λ = 1064нм); 2 - светоделитель; 3 - сигнальный световой пучок; 4 - многомодовый волоконный световод; 5 - чувствительный элемент; 6 - пьезоэлектрический излучатель; 7 - бассейн; 8 - фазовая четвертьволновая пластинка; 9 - опорный световой пучок; 10 - фоторефрактивный кристалл CdTe; 11 - фотодетектор; 12 - генератор электрических сигналов; 13 - осциллограф

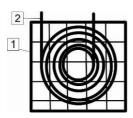


Рис. 2. Схема приемного модуля гидрофона: 1 - металлический каркас; 2 - уложенное спиралью оптическое волокно

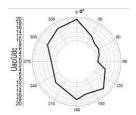


Рис. 3. Характеристика направленности приемного модуля гидрофона

Определена характеристика направленности приемного волоконнооптического модуля гидрофона (рис. 3). Также экспериментально были определены следующие параметры системы: пороговое звуковое давление 0,77 мПа, динамический диапазон 38,4 дБ, чувствительность 92дБ/Па.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-01122).

Список литературы

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

П.В. РЯБУХО 1 , С.А. САВОНИН 1 , О.А. ШАПОШНИКОВ 3 , В.П. РЯБУХО 1,2

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ²Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов ³НПЦ «АЛМАЗ-ФАЗОТРОН», Саратов

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗГИБНЫХ ЛЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ

Методом цифровой голографической интерферометрии определены поля температурных микродеформаций электронной платы. Выявлены величины максимального прогиба и остаточной деформации платы.

P.V. RYABUKHO¹, S.A. SAVONIN¹, O.A. SHAPOSHNIKOV³, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹Saratov state university named after N.G. Chernyshevskiy
²Institute of precision mechanics and control of the RAS, Saratov
³SPC "ALMAZ-FASOTRON", Saratov

DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF BENDING TEMPERATURE DEFORMATION OF ELECTRONIC BOARDS

Temperature microdeformation fields of electronic board were determined by digital holographic interferometry. Magnitudes of the maximum deflection and residual deformation of board were installed.

Метод цифровой голографической интерферометрии позволяет с помощью цифровой записи и численной обработки голограмм определить поле микросмещений поверхности объекта [1, 2]. В частности, возможно определение величин температурных деформаций прогиба электронной платы — соединения текстолитовой и алюминиевой (сплав Д-16) пластин, при изменении температуры платы и в результате различия коэффициентов термического расширения пластин.

Разработана оптическая схема (рис. 1) для цифровой записи голограммы и наблюдения за деформационными микросмещениями поверхности объекта посредством формирования цифровых $\vec{g}(x,y)$ деформируемой интерферограмм. Поле микроперемещений поверхности определялось по голографическим интерферограммам, формируемым в результате численной обработки цифровых голограмм, записанных при различных деформационных состояниях платы.

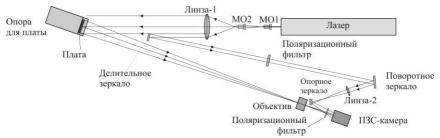


Рис. 1. Схема записи цифровых голограмм сфокусированного изображения объекта и реализации метода голографической интерферометрии поля деформаций поверхности исследуемого объекта

Процедура численной обработки голограмм включала: фурьепреобразование цифровой голограммы, фильтрацию пространственного спектра голограммы, в результате которой выделялась комплексная амплитуда спектра поля изображения платы, фурье-преобразование отфильтрованного фрагмента спектра и получение в численном виде комплексной амплитуды поля изображения объекта, формирование интерференционного изображения платы (рис. 2) в виде квадрата модуля суммы или разности комплексных амплитуд изображений платы, полученных при разной ее температуре.

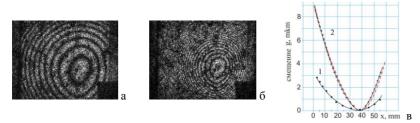


Рис. 2. Цифровые голографические интерферограммы деформационного прогиба платы при изменении ее температуры: на 5° C (a), на 10° C (б); кривые прогиба платы при изменении температуры на 5° C (1) и на 10° C (2) (в)

- 1. Schnars U., Jueptner W. Digital Holography. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- 2. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Цифровая голографическая интерферометрия микродеформаций рассеивающих объектов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2012. Т.12. Вып.1. С.12-17.

В.В. ТКАЧЕНКО

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЕТОДИОДНО-МАТРИЧНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ РАСТРОВЫХ ФОТОПЛОТТЕРОВ И ДИСПЛЕЕВ

Представлены архитектура, конструктивные и технологические особенности оптоэлектронных модулей на основе матриц светодиодов для растровой записи изображений фотооригиналов тиражируемых изделий (фотошаблонов, печатных форм) и для отображения информации с применением светодиодных экранов различного формата, в том числе стереовидеостен и стереоочков.

V.V. TKACHENKO

United institute of informatics problems of NAS of Belarus, Minsk

INTEGRATED LED-MATRIX MODULES FOR RASTER PHOTOPLOTTERS AND DISPLAYS

Development trends of circuitry and technological features of LED matrix modules for recoding and display technology are considered. There are miniaturization of element base and increasing of the resolution of "digit-light" conversion. High resolution at simultaneous reduction of the sizes of imaging the spot light will be accompanied by the process of integration of optoelectronic elements in constructive modules with standardized interfaces. When considering options for the use of modules offered solutions for the raster photolithography and LED screens.

Анализ трендов развития схемотехники технологических особенностей светодиодно-матричных растровой модулей фотолитографии и дисплейной техники свидетельствует о потребностях миниатюризации дальнейшей элементной базы повышения разрешающей способности преобразования «код-свет» [1]. Высокая разрешающая способность при одновременном уменьшении размеров экспонирующего светового пятна достигается уменьшением длины волны светоизлучающих (СИЛ) интеграцией диодов И элементов оптоэлектроники в конструктивные модули с унифицированными интерфейсами. Разработана архитектура модулей, выполняемых по гибридной технологии на базе ПЛИС (FPGA) и с применением СИД на структурах А^{III}В^V и А^{III}N. Степень интеграции, отвечающая требованиям функциональности технологичности, позволяет: 1) выполнить необходимые межсоединения для всех элементов на общей подложке с одним слоем металлизации; 2) реализовать индивидуальные таймеры для

каждого СИД, обеспечивающие непрерывность импульса экспонирования в пределах каждого пикселя при сохранении плавности модуляции, таким образом в два раза повысить быстродействие системы и исключить влияние эффекта невзаимозаместимости при экспонировании; 3) реализовать на уровне самого модуля при конфигурировании ПЛИС весь набор логических функций обработки данных изображения с параллельно-последовательным преобразованием и корректировкой кодов задания экспозиций с учетом геометрии расположения площадок СИД и способа развертки при фоторегистрации изображения; 4) обеспечить программируемость и технологичность настройки параметров в процессе сборки и эксплуатации.

Матрица светодиодов InGaN/GaN, размещенных вдоль общего катодного вывода, выполнена на сапфировой подложке и конструктивно входит в модуль (рис. 1) так, что вывод излучения осуществляется через

Удельной мощность излучения СИД 3 Вт/см² на длине волны 0,43-44 мкм позволяет с использованием соответствующей экспонировать растровые ОПТИКИ изображения с разрешением до 5 несенсибилизированных фотоматериалах И до 1 мкм фоторезистах, что порядок превышает возможности ранее разработанного модуля для матрицы

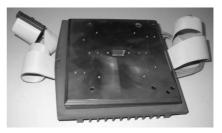


Рис. 1. Внешний вид модуля

256 СИД с длиной волны излучения 0,66 мкм. При рассмотрении вариантов использования разработанных модулей предложены решения для светодиодных экранов, ориентированные на технологические возможности отечественного производства изделий микроэлектроники. Предложены схемотехнические решения [2] на основе скоростных интерфейсов передачи графических данных, которые обеспечивают повышенную частоту смены кадров, одновременную компенсацию нелинейности цифроаналогового преобразования «код-свет» и коррекцию градационной характеристики вывода в реальном масштабе времени, требуемые для получения многоракурсных стереоизображений.

- 1. Ткаченко В.В. Схемотехника интегральных модулей со светодиодными матрицами для растровых фотоплоттеров и дисплеев // 1 Рос.-Бел. НТК «ЭБОР». Н.Новгород. 2013. С.106-109.
 - 2. Патент №ВҮ8991U (МПК G 09G 3/32) по заявке №и20120652 от 03.06.2012.

Я.С. БЫЧКОВСКИЙ, Б.Н. ДРАЖНИКОВ, К.В. КОЗЛОВ, И.С. КОНДЮШИН, В.Н. СОЛЯКОВ

ОАО «НПО «Орион», Москва

УСТАНОВКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОПРИЕМНОГО МОДУЛЯ С ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ НАКОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КАДМИЙ-РТУТЬ-ТЕЛЛУР

Разработана установка измерения параметров фотоприемных модулей на основе кадмий-ртуть-теллур (КРТ), позволяющая существенно сократить время измерений и увеличить точность получаемых результатов. Использование ЭВМ с платой АЦП и программы управления, разработанной в среде LabView, позволяет производить гибкую настройку, в зависимости от объекта измерений.

Ya.S. BYCHKOVSKIY, B.N. DRAZHNIKOV, V.N. SOLYAKOV, I.S. KONDYUSHIN, K.V. KOZLOV

Orion research and production association, Moscow

MEASUREMENT EQUIPMENT FOR INVESTIGATION MCT PHOTODETECTOR WITH TDI

Designed installation measurement of parameters photodetector modules based on MCT significantly reduces measurement time and increase the accuracy of the results. Using a computer with ADC board and management program, developed in the environment of LabView, allows to customize, depending on the measurement object.

При разработке и изготовлении многоэлементных ИК-фотоприемников возникает необходимость промежуточного контроля сборок: матрица фоточувствительных элементов – большая интегральная схема (БИС) считывания [1]. Основными критериями оценки качества сборки фотоприемного модуля (ФМ) служат фотоэлектрические параметры, которые определяют временные и пространственные характеристики изготовляемых фотоприемных устройств (ФПУ). В работе предлагается описание установки измерения параметров фотомодуля с матрицей чувствительных элементов и БИС, работающей в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Назначением измеряемой системы в составе ФПУ является регистрация, первичная обработка и фильтрация сигналов, их мультиплексирование. Фоточувствительный слой состоит из 1024 столбцов (каналов), по 10 чувствительных элементов в каждом, что позволяет производить суммирование сигналов с каждых 10 элементов в

ВЗН. Накопление и фильтрация сигналов с каждого чувствительного элемента производится во входных ячейках БИС считывания. Далее сигналы поступают на сумматоры, где производится суммирование заряда в режиме ВЗН. Полученные сигналы мультиплексируются в 2 канала и выводятся последовательно для дальнейшей обработки.

При проведении измерений используется специально разработанное и изготовленное нестандартное оборудование, а также стандартные измерительные приборы. При подготовке к измерениям фотомодуль устанавливается в криостат, который подключается к сосуду Дьюара с жидким азотом. Испаряемый из сосуда Дьюара азот обеспечивает охлаждение ФМ до температуры 170К. Блок управления ФМ обеспечивает формирование и подачу на ФМ напряжений питания, импульсов управления и установку режима формирования сигнала.

ИК-излучение АЧТ через диафрагму диаметром D, периодически прерываемое электромеханическим модулятором через сапфировое окно фоточувствительные элементы поступает на фотомодуля. В настоящей методике измерений применена модуляция излучения АЧТ с помощью диска прерывателя, обеспечивающего подачу оптического сигнала в виде импульсов длительностью 25 мс с периодом повторения 50 мс с длительностью фронтов не более 1 мс. Такая модуляция обеспечивает возможность накопления сигнала в ВЗН-фильтре по экспоненциальному закону. Выходной сигнал ФМ поступает через плату АЦП измерительной стойки на персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением, написанным на ANSI C и LabView [2]. Плата АЦП преобразует выходные сигналы фотомодуля в цифровой код, который используется в измерительных программах. Синхронизация моментов оцифровки с амплитудными значениями осуществляется с помощью выходных сигналов ΦМ последовательностей, формируемых ПЛИС Блока управления ФМ и подаваемых на цифровые входы платы АЦП [3]. Автоматизация реализуется благодаря непрерывному взаимодействию компьютерной измерительной программы и микросхемы ПЛИС Блока управления ФМ по цифровым линиям связи. По окончанию измерений, компьютерная программа формирует протокол измерения, в котором содержатся основные параметры ФМ.

- 1. Козлов К.В., Бычковский Я.С., Кондюшин И.С. и др. // Прикл. физика 2014. №2. С.64.
- 2. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В., Папуловский В.Ф. LabVIEW. Практикум по основам измерительных технологий. М.: ДМК-пресс, 2011.
 - 3. Козлов К.В., Бычковский Я.С., Кондюшин И.С. и др.// Усп.прикл.физики. 2014. Т.2. №2.

А.Ю. ИВАНОВ, И.А. ЛЯВШУК, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЗРАЧНЫХ КЛИНОВИДНЫХ ПОДЛОЖЕК ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрено влияние аберраций интерферометра на точность измерительного контроля прозрачных клиновидных подложек дифракционных элементов. Рассмотрен способ их исключения для случая измерительного контроля прозрачных клиновидных подложек дифракционных элементов для двухлучевых интерферометров с разнесенными объектной и опорной ветвями.

A.Yu. IVANOV, I.A. LYAVSHUK, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala state university, Grodno, Belarus

ANALYSIS OF ABERRATION INFLUENCE ON THE MEASUREMENT CONTROL PRECISION OF THE TRANSPARENT WEDGE-FORMED LAYS OF DIFFRACTION ELEMENTS

Influence of the interferometer aberrations on the precision of measurement control of the transparent wedge-formed lays of diffraction elements was observed. The way of their exception for the case of measurement control of transparent wedge-formed lays of diffraction elements for the biaxial interferometers with object and reference channels separated was also observed.

Возможность объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях определенного класса фазовых объектов, для которых исследуемый параметр постоянен в плоскости, перпендикулярной направлению распространения зондирующей световой волны, впервые был обоснован и экспериментально подтвержден для прозрачных клиновидных пластин [1, 2]. Было показано, что для таких объектов при их интерференционном исследовании возможно в интерференционной картине формирование нескольких независимых интерферограмм, соответствующих зонам измерения и зонам контроля параметра. В данной работе проанализировано влияние аберраций интерферометра на точность измерительного контроля прозрачных клиновидных подложек дифракционных элементов.

Рассмотрен вариант реализации объединения процедуры измерения и контроля клиновидности прозрачных пластин, используемых для изготовления дифракционных элементов, для классических двухлучевых интерферометров типа Маха-Цендера или Майкельсона.

Показано, что располагая эталонную и контролируемую подложки определенным образом, можно сформировать интерференционную картину в виде двух интерферограмм, соответствующих зонам измерения и В контроля. Однако при формировании интерференционных картин в зонах измерения и контроля из-за аберраций интерферометра. определяемых функцией $\Delta \varepsilon_{cm}$, происходит искажение снижает интерференционных полос. что точность измерений достоверность контроля угла клина. На практике при измерительном контроле подложек углы клиновидности исследуемой у с и эталонной γ_m подложек обычно отличаются на малую величину, и в этом случае справедливо неравенство $\gamma_c - \gamma_m << \gamma_c$. На основании этого можно утверждать, что наибольшее влияние данные аберрации оказывают на достоверность контроля вследствие возможной соизмеримости полезного сигнала и искажений, создаваемых аберрациями $\Delta \varepsilon_{cm}$ для зоны B.

Этими искажениями можно пренебречь в случае
$$\frac{2\pi (\gamma_c - \gamma_m)(n-1)x}{\lambda} >> \Delta \varepsilon_{c,m} \ , \tag{1}$$

325

где n – показатель преломления материала прозрачной подложки, λ – длина волны когерентного источника света.

В случае заметных аберраций условие (1) может не выполняться. Возникающие искажения полос в интерференционной картине можно компенсировать, используя эталонную голограмму [3]. В данном случае эталонная голограмма выполняет функцию не только компенсатора искажений во всех зонах формирования интерференционной картины, но и выступает в качестве эталона при формировании зоны контроля.

При апробации голографического варианта измерительного контроля достигнуто снижение величины аберрации от 3π до уровня, не превышающего $\pi/10$.

- 1. Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. 2010. Т.36. Вып.20. С.87-94.
- 2. Ляликов А.М. // ЖТФ. 2014. Т.84. Вып.6. С.114-118.
- 3. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.

В.А. КОМОЦКИЙ, Н.В. СУЕТИН, Д.С. ЧЕХАНОВСКИЙ

Российский университет дружбы народов, Москва ¹Бизнес-центр «Пискаревский», Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ВОЛН 10.6 мкм НА ОТРАЖАЮЩИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ

Экспериментально исследована дифракция излучения $\lambda = 10.6$ мкм на глубокой отражающей дифракционной решетке (глубина 15 мкм) при различных углах падения. Изучен характер изменения интенсивностей нулевого и первых порядков при изменении угла падения пучка.

V.A. KOMOTSKII, N.V. SUETIN, D.S. CHEKHANOVSKII¹

Peoples' friendship university of Russia, Moscow

¹Business-center "Piskarevskii", Saint-Petersburg

THE INVESTIGATION OF 10.6 mkm RADIATION DIFFRACTION ON REFLECTIVE DIFFRACTION GRATINGS

Coherent 10.6 um radiation diffracted on deep reflective grating was investigated. Power ratios in diffraction orders with different angles of incidence were estimated.

Модулятор мощности когерентного излучения может быть построен с применением глубокой отражающей дифракционной решетки (ДР). [1]. В связи с этим в данной работе поставлена задача исследовать дифракцию излучения лазера с $\lambda = 10.6$ мкм на ДР, глубина которой превышает λ .

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Идеальная отражающая ДР должна иметь прямоугольный профиль типа «меандр». Для эксперимента ДР была изготовлена на медном полированном диске методом лазерной гравировки. Период ДР 150мкм, а глубина h составляла 15 мкм. Форма ДР несколько отличалась от прямоугольной. Выражения, определяющие зависимость мощности в нулевом и первых порядках дифракции от глубины идеальной ДР и угла падения лазерного пучка Θ имеют вид [2]:

$$P_{0} = P_{\phi\phi} \cos^{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\cos\Theta\right)$$

$$P_{\pm 1} = 4/\pi^{2} P_{\phi\phi} \sin^{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\cos\Theta\right)$$

На рис. 2 даны зависимости мощностей дифракционных порядков от угла падения при $\lambda=10.6$ мкм и глубине ДР 15 мкм.

Соотношение интенсивностей излучения в дифракционных порядках определялось по тепловым следам, на экране, покрытом жидкокристаллическим (ЖК) слоем. Ряд экспериментальных фотографий, сделанных при различных углах падения, представлен на рис. 3.

На основании экспериментов показано, что ДР, полученная методом лазерной гравировки может быть применена для управления мощностью лазерного излучения $\lambda = 10.6$ мкм в дифракционных порядках.

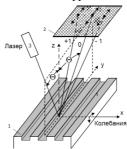


Рис. 1. Схема эксперимента по наблюдению дифракции на отражающей ДР. На схеме: отражающая ДР (1), экран с ЖК слоем (2), CO₂ лазер (3)

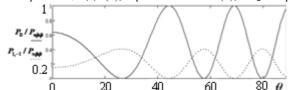


Рис. 2. Зависимости приведенных мощностей в нулевом и первых порядках дифракции от угла падения лазерного пучка на ДР с глубиной 15 мкм

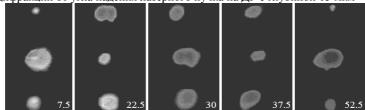


Рис.3. Картина, показывающая соотношения интенсивностей в нулевом и первых порядках дифракции при различных углах падения

- 1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Басистый Е.В., Модулятор лазерного излучения // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №6. С.1-4.
- 2. Комоцкий В.А., Корольков В.И., Соколов Ю.М., Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений // Фотоника. 2011. №1. С.16-19.

И.А. ЛЯВШУК, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОДЛОЖЕК МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЮ ОДНОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

Рассмотрен и экспериментально опробован метод, объединяющий процедуры измерения и контроля клиновидности подложек микроструктурированных элементов, для интерферометров типа Физо с объектным и опорным каналами, расположенными на одной оптической оси.

I.A. LYAVSHUK ,A.M. LYALIKOV

Janka Kupala state university, Grodno, Belarus

THE MEASUREMENT CONTROL OF THE MICROSTRUCTURED ELEMENTS LAYS REALIZATION BY MEANS OF THE SINGLE-CHANNEL LASER INTERFEROMETERS

A method to combine the procedures of measurement and control of transparent wedged plates for Fizeau interferometers with object and reference channels positioned on one optical axis is proposed and experimentally tested.

В интерферометрах типа Физо [1] в отличие от интерферометров с разнесенными объектным и опорным каналами, последние расположены на одной оптической оси, что вызывает затруднение использования подхода при объединение вышерассмотренных контрольно-измерительных процедур по методике, предложенной в работе [2].

В работе сообщается о возможности объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях подложек микроструктурированных элементов с помощью интерферометров с объектным и опорным каналами, расположенными на одной оптической оси.

На рис. 1 изображена оптическая схема разработанного устройства. Коллимированный световой пучок формируется лазерным источником света 1 и телескопической системой 2 и 3. Объектный и опорный световые пучки образуются посредством двух оптических элементов:

полупрозрачной пластины 5 и зеркала 8. В зоне объектного канала располагаются эталонный 6 и исследуемый 7 микроструктурированные элементы.

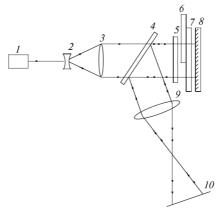


Рис. 1. Оптическая схема устройства измерительного контроля, выполненная на основе интерферометра Физо: 1 - лазер; 2, 3 - телескопическая система; 4, 5 - полупрозрачные пластины; 6, 7 - эталонный и исследуемый оптические

элементы; 8 - зеркало; 9 - объектив; 10 - фоторегистратор интерференционной картины

Кроме этого элементы в объектном канале располагаются по отношению к световому пучку таким образом, чтобы исследуемый 7 элемент полностью, а эталонный 6 частично перекрывали зондирующий световой пучок. Такое расположение элементов позволяет сформировать в плоскости 10 интерференционную картину с зоной как свободной от наложения контуров изображения исследуемой и эталонной элементов, так и зону с их совмещением. Плоскость формирования интерференционной картины 10 и плоскость микроструктурированных элементов 6,7 оптически сопрягаются объективом 9.

Был проведен измерительный контроль качества пары подложек микроструктурированных элементов, один из которых являлся эталонным.

- 1. Malacara D, Servín M., Malacara Z. Interferogram analysis for optical testing. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.
 - 2. Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. 2010. Т.36. Вып.20. С.87-94.

В.А. КОЛЧИНСКИЙ 1,2 , Р.В. РОМАШКО 1,2

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ПРОФИЛОМЕТРА

В настоящей работе приведены результаты определения показателя преломления нитрида галлия (GaN), не легированного примесями, с помощью лазерного профилометра.

V.A. KOLCHINSKIY^{1,2}, R.V. ROMASHKO^{1,2}

¹Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok ²Far-Eastern federal university, Vladivostok

MEASUREMENT OF THE REFRACTIVE INDEX USING A LASER PROFILOMETER

In present work, the refractive index of the undoped sample of gallium nitride (GaN), with size $10mm\times10mm\times150$ mkm , is defined, by using of laser profilometer.

Определен показатель преломления образца нитрида галлия (GaN), не легированного примесями (размер образца составлял $10\times10\times0,15$ мм), с помощью лазерного профилометра. Определение показателя преломления проводилось на длинах волн лазерного излучения: 470, 561 и 632 нм [1,2].

Образец помещался на прецизионную поворотную платформу по нормали к направлению распространения лазерного излучения. Для исключения попадания лазерного излучения, рассеянного образцом, обратно в лазер, использовался оптический изолятор. Для увеличения точности определения показателя преломления, был использован пространственный фильтр, представляющий собой комбинацию двух плоско-выпуклых линз и диафрагмы.

На рис. 1 представлены экспериментальные результаты, полученные при определении показателя преломления образца GaN на длине волны оптического излучения λ =561 нм, в сравнении со справочными данными [3]. Показатель преломления определялся в диапазоне поворота образца от 1 до 45 градусов относительно направления распространения лазерного излучения. Как видно из рисунка среднее значение показателя преломления GaN составило $n(561) = 2,410\pm0,006$. Определенные с помощью профилометра значения показателя преломления образца для

длин волн лазерного излучения 470 нм и 632 нм составили: $n(470)=2,468\pm0,003$ и $n(632)=2,385\pm0,004$ соответственно.

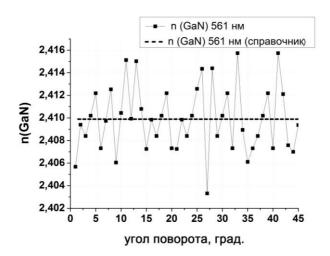


Рис. 1. Показатель преломления GaN на длине волны лазерного излучения 561 нм

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что значения показателя преломления находятся в соответствии с результатами полученными другими методами [4]. Данный метод ранее не использовался для измерения показателя преломления. Сочетание таких качеств, как простота и относительно высокая скорость получения результата, позволяет использовать данный метод для экспресс измерений показателя преломления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-01122).

- 1. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. Нитрид галлия перспективный материал электронной техники Часть І. Фундаментальные свойства нитрида галлия // Материаловедение. 1999. №9. С.950-962.
- 2. Günter P., Huignard J.P. (ed.). Photorefractive materials and their applications. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- 3. Bass M., et. al. Handbook of Optics, volume IV: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics (set). McGraw Hill Professional, 2009. T.4.
- 4. Chin V.W.L., Tansley T.L., Osotchan T. Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides // Journal of Applied Physics. 1994. T.75. №.11. C.7365-7372.

Н.А. КРЮКОВ, С.А ПЕГАНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

О ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В работе рассмотрена проблема дискретизации физических сигналов, обсуждены критерии реализации точности измерения и применения статистических аппроксимаций в оптических экспериментах.

N.A. KRYUKOV, S.A PEGANOV

Saint-Petersburg state university

ON THE ACCURACY AND RELIABILITY OF OPTICAL MEASUREMENTS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS

In our work we have considered the problem of sampling physical signals, discussed performance criteria measurement accuracy and application of statistical approximations in optical experiments.

Класс задач, связанных с нахождением величин пространственных градиентов или временных характеристик, описывается динамическими переменными, которые выражаются операторами d/dt или d/dx. Измерение подобных характеристик возможно в рамках решения обратных задач с учетом методов регуляризации [1], либо прямых измерений частотных

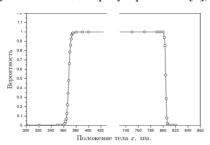


Рис. 1. Вероятность приема зондирующего импульса

зависимостей регистрации искомых величин и вычисления значений ПО найденным функциям статистического распределения [2]. В данной работе на примере оптических измерений продолжено нахождение кинематических величин с учетом дискретного характера измерения скорости тела и аналогового поведения перемещения. Регистрируемые сигналы представляют свертку

аппаратной функции прибора и оптического отклика, который содержит искомую информацию и аддитивную компоненту в виде «белого» шума.

Возможные значения измеряемых величин получаются как спектр собственных значений соответствующих операторов. Изучено поведение пропускной способности в оптическом канале в зависимости от положения тела (рис. 1). На рис. 2 представлены результаты вычисления стохастической обработки сигналов и регистрации отклика с учётом шума во всем диапазоне значений геометрии апертуры и за ее пределами. Экспериментально найденные значения построенной гистограммы имеют асимметричный вид относительно искомой величины пути, который отвечает характеристикам вероятности прохождения зондирующего импульса (см. рис. 1). Для применения гауссовой функции распределения часто пользуются гипотезой о равновероятности отклонений от среднего значения. Результат аппроксимации приведен на рис. 2 в виде сплошной линии и показывает неадекватность получаемого значения пути и частотной закономерности. Моделирование «белого» шума и учет его в регистрируемом сигнале позволяет получить симметричную гистограмму и найти параметры распределения Гаусса для заданного числа измерений (см. рис. 3).

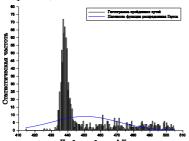


Рис. 2. Плотность распределения вероятности отклика во всем диапазоне пройденных путей



Рис. 3. Плотность распределения вероятности пути в пределах действующей апертуры

Проблема точности и надежности оптических измерений является актуальной задачей когерентной фотоники для применения в современных информационных методах обработки экспериментальных данных [3].

- 1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
- 2. Крюков Н.А., Пеганов С.А. О регуляризации в измерениях скорости // III Всерос. конф. по фотонике и информационной оптике. Сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С.280.
 - 3. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. М.: БИНОМ, 2007.

А.Н. МАЛОВ, А.А. ВАЙЧАС¹

Иркутский государственный медицинский университет ¹Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОРИСТОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ПОВЕРГАЮЩЕЙСЯ КОМПРЕССИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Обсуждаются результаты модельного эксперимента по исследованию распределения лазерного излучения в рассеивающей среде, подвергающейся компрессионному воздействию. В качестве модели использовался поролон, источник излучения – лазерный диод.

A.N. MALOV, A.A. VAYCHAS¹

Irkutsk state medical university

¹Irkutsk branch of Moscow state technical university of civil aviation

LASER RADIATION DISTRIBUTION IN THE POROUS SCATTERING COMPRESSED MEDIA

Modeling experiment results of research of laser radiation distribution in the porous scattering compressed media are discussed. As model foam rubber, a radiation source – the laser diode was used.

Известно, надавливании биологическую что при на ткань интенсивность прошедшего через неё лазерного излучения увеличивается [1, 2]. Данный эффект имеет важное значение, поскольку может быть использован для доставки лазерного излучения в биоткани, как для диагностики, так и терапии, но в отличие от инвазивных методов введения лазерного излучения в организм, применение этого эффекта не связано с повреждением тканей организма. Кроме того, в последнее время доступны и в связи с этим получили большое распространение полупроводниковые лазеры, излучение которых по своим характеристикам отличается от излучения гелий-неоновых, которые использовались в [1]. Таким образом, целью настоящей работы исследование распределения лазерного рассеивающей среде, подвергающейся компрессионному воздействию. Представляло интерес изучить распространение в рассеивающих средах излучения именно полупроводникового лазера.

Поэтому качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер (длина волны 532 нм, мощность 8 мВт). В качестве объекта исследования - поролон, размеры ячеек которого варьировались в пределах 0,2 - 1 мм. Излучение лазера направлялось на поролон, который находился между двумя прозрачными пластинками из оргстекла. Одна из пластинок могла перемещаться, что позволяло изменять толщину исследуемого образца. Пятно рассеянного света, а распределение рассеянного излучения фиксировались с помощью фотоаппарата. Толщина исследуемого образца изменялась от 22 до 2 мм с шагом 2 мм. В результате эксперимента, как и в [1], было установлено, что при сжатии поролона рассеяние света уменьшается, и излучение концентрируется в приосевой области лазерного пучка в пределах его первоначальных размеров (рис. 1, верхний этого, были зафиксированы изменения Кроме распределения рассеянного излучения (рис. 1, нижний ряд). Из рис. 1 видно, что при уменьшении толщины объекта распределение рассеянного излучения стремится к гауссовой форме.

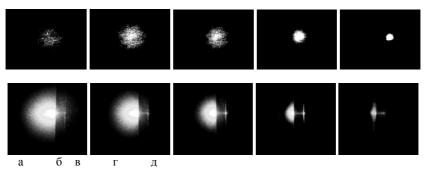


Рис. 1. Результаты эксперимента: верхний ряд – фото пятна рассеянного света; нижний ряд – фото распределения рассеянного излучения при уменьшении толщины: 22 мм (а), 18 мм (б), 14 мм (в), 6 мм (г), 2 мм (д)

- 1. Аскарьян Г.А. Возможности усиления прохождения света и других видов излучения через мягкие мутные физические и биологические среды // УФН. 1983. Т.139. №2. С.368–370.
- 2. Нахаева И.А., Зюрюкина О.А., Мохаммед М.Р., Синичкин Ю.П. Исследование влияния внешней механической компрессии на оптические свойства ткани кожи человека in vivo // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине 2014.: материалы Всерос. школы-семинара. Саратов: Изд-во Саратовский источник, 2014. С.93-94.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, А.П. РУСИНОВ

Оренбургский государственный университет

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ВБЛИЗИ СФЕРИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НАНОЧАСТИЦЫ

Исследованы зависимости поглощения, также спонтанного индуцированного излучения молекул, размещенных около глобулярных металлических наночастиц в прозрачных средах, от конфигурационных и диэлектрических параметров таких систем. Определены условия локального усиления или подавления поглощения молекул, равно как и изменения интегральных характеристик растворов соответствующих нанорезонаторами.

M.G. KUCHERENKO, A.P. RUSINOV

Orenburg state university

THE INTERFERENCE EFFECTS OF THE MOLECULAR LIGHT ABSORPTION NEAR SPHERICAL METAL NANOPARTICLES

The dependences of the absorption as well as spontaneous and stimulated emission of molecules placed near globular metal nanoparticles in transparent environments are investigated on configuration and dielectric parameters of such systems. The conditions of locally enhance or suppress of the molecules absorption, as well as modifies their integral characteristics in solutions with a plasmon nanoresonators are defined.

Скорость $w(\omega)$ индуцированных электромагнитным полем $\mathbf{E}_0(\omega)$ переходов в молекуле, находящейся вблизи поляризующейся наночастицы (НЧ) определяется, в том числе, и ее локальным полем $\ddot{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\alpha(\omega)\mathbf{E}_0(\omega)$ [1] $w(\omega) \sim \left|\mathbf{p}\right|\ddot{\mathbf{I}} + \ddot{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\alpha(\omega)\right|^2\mathbf{E}_0(\omega)\right|^2g_D(\omega)$, (1)

где \mathbf{p} — вектор дипольного момента молекулы красителя, $g_D(\omega)$ — формфактор линии поглощения красителя, $\alpha(\omega)$ — поляризуемость НЧ. Тензор $\left[\ddot{\mathbf{I}} + \ddot{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\alpha(\omega)\right]$, зависящий от свойств НЧ и конфигурационных параметров системы, преобразует первичное поле в результирующее.

На рис. 1 показано, что в зависимости от угловых конфигурационных параметров системы «поле-наночастица-молекула» возможно как

усиление, так и ослабление молекулярного поглощения. Усреднение вероятности перехода по всевозможным угловым конфигурациям, проведенное для случая изотропной системы показало, что среднее значение скалярной величины $\mathbf{p}\ddot{\mathbf{G}}(\mathbf{r})\mathbf{E}_0$ существенно положительно.

Из (1) видно, что лишь первое слагаемое $w_0 = \mathbf{pE}_0^2$ отвечает за поглощение самой молекулы, а другие — отражают вклад НЧ. При этом одно из этих — дополнительных — слагаемых всегда положительно, а второе — может иметь любой знак: как «+» так и «-» (рис. 2). Таким образом, добавление металлических НЧ в систему с фотоактивируемыми молекулами чаще всего приводит к увеличению поглощения света последними. Эффект подавления поглощения возможен только при $\omega_n' < \omega$ и определенных соотношениях между $\mathrm{Re}\alpha(\omega)$ и $|\alpha(\omega)|^2$.

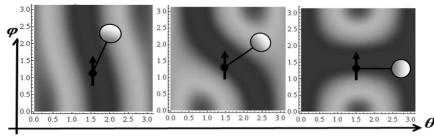


Рис. 1. Зависимости вероятности перехода от ориентации дипольного момента молекулы и радиус-вектора НЧ. Вертикальная поляризация внешнего поля

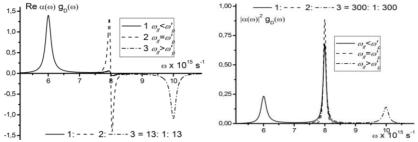


Рис. 2. Частотные зависимости дополнительных слагаемых вероятности перехода при различных соотношениях частоты $\omega_p' = \omega_p / \sqrt{1 + 2\varepsilon_m}$ плазмонного резонанса НЧ в среде и частоты ω_p поглощения красителя

Список литературы 1. Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Кучеренко М.Г // Вестн. ОГУ. 2014. №9. Т.170. С.80-88.

Л.Е. СЕМЕНОВА

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ A_2B_6

В рамках трехзонной модели рассмотрены процессы резонансного гиперкомбинационного рассеяния для кристаллов A_2B_6 структуры вюртцита.

L.E. SEMENOVA

Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

HYPER-RAMAN SCATTERING IN A₂B₆ COMPOUNDS

The resonant hyper-Raman scattering processes in the A₂B₆ compounds with wurtzite structure are considered within the framework of the three-band model.

Целью данной работы было теоретическое исследование гиперкомбинационного рассеяния (ГКР) света в полупроводниковых кристаллах типа A_2B_6 гексагональной структуры при двухфотонном возбуждении вблизи края поглощения. Резонансное ГКР рассматривалось в ряде работ [1,2], и было показано, что наряду с механизмом рассеяния, которому соответствует последовательность промежуточных экситонных состояний s-p-s, могут также вносить заметный вклад процессы ГКР, связанные с двухфотонным переходом в экситоны s-типа. Однако оценить их роль сложно, поскольку для этого необходимо учитывать переходы в вышележащие зоны проводимости и нижележащие зоны валентности.

Во многих прямозонных полупроводниках A_2B_6 со структурой вюртцита нижняя зона проводимости c имеет симметрию Γ_7 , верхняя валентная зона v расщепляется на три подзоны Γ_9 , Γ_7 и Γ_7 , а дипольные переходы из зон c и v разрешены в вышележащую зону проводимости c (Γ_9 , Γ_7 , Γ_7). Поэтому в данной работе ГКР рассматривалось в рамках такой трехзонной модели. С применением операторов проектирования были построены волновые функции экситонов. Это позволило найти матричные элементы двухфотонных переходов в экситоны s- и p-типа s- и s-

Была рассмотрена 90°-геометрия рассеяния при направлении возбуждающего излучения вдоль оптической оси. Показано, что в этом

случае увеличение сечения рассеяния возможно при приближении к двухфотонному резонансу с 1S экситоном серии B, поскольку двухфотонный переход в 1S экситон серии A, разрешенный правилами отбора, возможен в данной модели при учете магнито-дипольных переходов или при предположении о расщеплении вышележащей зоны проводимости, и его вклад в рассеяние несущественен. Для кристалла CdS с помощью известных эффективных масс электрона и дырки [3] были оценены матричные элементы дипольных переходов в зону проводимости c и вычислена частотная зависимость сечения ГКР на LO-фононах для различных направлений волнового вектора рассеянного света $\mathbf{q}_{\mathbf{S}}$ и поляризации возбуждающего излучения $\mathbf{\varepsilon}_{\mathbf{L}}$ (рис. 1).

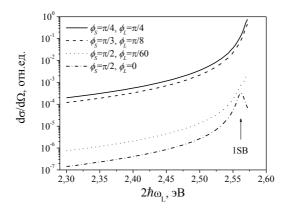


Рис. 1. Сечение ГКР в зависимости от $2\hbar\omega_L$, вычисленное для различных ϕ_S и ϕ_L , где $\phi_S(\phi_L)$ – угол между $\mathbf{q}_S(\mathbf{\epsilon}_L)$ и осью x, ω_L – частота падающего излучения

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации № НШ-451.2014.2).

- 1. Семенова Л.Е., Прохоров К.А. // ЖЭТФ. 2003. Т.123. №5. С.1048-1058.
- 2. García-Cristóbal A., Cantarero A., Trallero-Ginner C., Cardona M. // Phys. Rev. B. 1998. V.58. P.10443-10451.
- 3. Nguyen Ba An, Nguyen Van Hieu, Nguyen Toan Thang, Nguyen Ai Viet // Phys. Rev. B. 1982.V.25. P.4075-4080.

СВ ИВАНОВА

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

КВАЗИУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАРЦЕ

Исследовалось температурное поведение интенсивности пиний комбинационного рассеяния и центрального пика области 20-800°С. Обнаружены аномалии температурных кривых интенсивности на комбинационных мод и центрального пика при температурах вблизи 300, 400°C и при температуре α-β перехода в кварце (573°C). Предполагается, что аномалии связаны с трансформацией нанодоменных структур в этом кристалле

S.V. IVANOVA

Lebedev physical institute of RAS, Moscow

QUASIELASTIC LIGHT SCATTERING IN QUARTZ

It have been investigated the temperature behavior of Raman scattering lines and central peak intensity in range of 20-800°C. Its were observed the anomalies on the temperature curves of Raman modes and central peak at temperature of about 300, 400°C and at temperature of $\alpha\text{-}\beta$ transition in quartz 573°C). It have made the conclusion, that anomalies have connected with transformation of nanodomain structures in this crystal

Известно, что при температуре 573° С кварц испытывает фазовый переход из высокотемпературной β — фазы в низкотемпературную α — фазу [1]. Авторы работы [2] предположили существование несоразмерной фазы в решетке кристалла между α - и β - фазами. Эта фаза была экспериментально подтверждена в ряде работ [3, 4] в узком температурном интервале (1.5°). Из расчетов теоретико-группового анализа [4] следует, что оптические колебания в кристалле кварца распределены по классам симметрии, где A1 и E колебания могут проявляться в спектрах комбинационного рассеяния [5].

Появление центрального пика в дополнение к нормальной мягкой моде в спектрах рассеяния материалов, испытывающих фазовые переходы, представляет большой интерес. Изучение температурного поведения центрального пика было осуществлено в работе [6].

В настоящей работе проведены исследования рассеяния света в низкочастотной области спектра $(0-300~{\rm cm}^{-1})$ при температурах от $20~{\rm дo}$ 800° С. Спектры комбинационного рассеяния были получены путем

возбуждения кристаллов излучением аргонового лазера ($\lambda=514.5$ nm). Исследованные образцы имели размер 5x5x3 мм3 и направление оптической с-оси в плоскости кристалла. Образец помещался в высокотемпературную печь, температура образцов контролировалась платино-платинородиевой термопарой. Поляризация луча была параллельна или перпендикулярна оптической оси кристалла. Спектральная ширина щели была для спектров $1.5~{\rm cm}^{-1}$. Исследование температурной зависимости центрального пика было осуществлено при тех же экспериментальных условиях с шириной щели $0.6~{\rm cm}^{-1}$. Для исследования спектров использовался спектрометр ДФС-12.

В работе были получены температурные спектры кварца и проанализирована их связь с результатами структурных исследований. Был обнаружен динамический центральный пик одновременно с боковыми компонентами. На температурных кривых интенсивности комбинационных AI и E мод (в максимуме) и центрального пика были обнаружены аномалии вблизи температур 300 и 400°С. Резкий скачек наблюдался на температурных кривых интенсивности комбинационных мод и центрального пика при 573°С. Изменение интенсивности при этой температуре соответствует температуре, при которой происходит $\alpha - \beta$ перехода первого рода в кварце ($T\alpha$ - β). Можно предположить, что аномалии в области 400°С связаны с трансформацией нанодоменных структур в α - фазе кристалла. Возможно, что при этой температуре происходит домен-доменный фазовый переход. второго рода..

Можно предположить, что появление динамического центрального пика при изучении спектров комбинационного рассеяния при 573°C связано с взаимодействием линии второго порядка и движением доменных структур между α- и β- фазами в соответствии с [5].

- 1. Yamamoto N., Tsuda K., Yagi K. High voltage microscope study of incommensurate phase in quartz // J. of the Phys. Soc. Japan. 1988. V.57. P.1352-1364.
- 2. Aslanian T.A., Levanyuk A.G.. On the possibility of the incommensurate phase near $\alpha-\beta$ transition point in quartz // Solid State Commun. 1979. V.31. P.547-550.
- 3. Dolino G., Mogeon F., Bastie P. Birefringence and ray study of irreversible behavior of incommensurate of quartz // Phys. Stat. Sol. a. 1988. V.107. Is.2. P.559–570.
- $4.Scott\,J.F.,\,Porto\,S.P.S.$ Longitudinal and transverse optical lattice vibration in quartz // Phys. Rev. 1967. V.3. P.903-910.
- 5. Scott J.F. Evidence of coupling between one- and two- phonon excitations in quartz $\!\!\!/\!\!\!/$ Phys. Rev. Letters. 1968. V.21. P.907-910.
- 6. Ivanova S.V. The temperature investigation of the Raman and elastic light scattering in quartz crystals // Journal of Molecular structure. 1993. V.294. P.183-186.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

Санкт-Петербургский государственный университет

ИНФОРМАЦИЯ ФИШЕРА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ДВУХАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЫ

В первом порядке ВКБ приближения получено выражение для информации Фишера колебательных состояний двухатомной молекулы и предложен количественный критерий применимости этого выражения. Эффективность полученного выражения показана на примере определения информации Фишера колебательных уровней состояния $X^1\Sigma_{\rm g}^+$ молекулы $^7{\rm Li}_2$.

S A ASTASHKEVICH

Sankt-Petersburg state university

FISHER INFORMATION OF VIBRATIONAL STATES OF DIATOMIC MOLECULES

An expression for Fisher information of vibrational states of diatomic molecule is obtained in the first-order of WKB approximation and a quantitative criterion of its applicability is proposed. The efficiency of obtained expression is demonstrated by calculating the Fisher information of vibrational levels of the $X^1\Sigma_g^+$ state of the 7Li_2 .

Несмотря на широкое использование информации Фишера (ИФ) в квантовой информатике и контроле [1], в литературе отсутствует систематический анализ ИФ колебательных состояний двухатомных молекул, что и являлось целью настоящей работы. ИФ колебательного состояния у двухатомной молекулы определяется формулой:

$$I_V = \int_0^\infty \rho_V(r) \left[d \ln \rho_V(r) / dr \right]^2 dr,$$

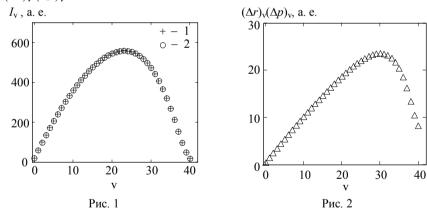
где $ho_V(r)$ — зависимость плотности вероятности от межьядерного расстояния r для состояния с колебательным квантовым числом v. Учитывая то, что $ho_V(r)$ обратно пропорциональна импульсу молекулы $p_V(r)$, используя формулу квантования момента импульса для первого порядка ВКБ приближения и дифференцируя эту формулу по v, мы получили:

$$I_V = (4\mu/\hbar^2)(V + 1/2)dE_V/dV$$
,

где $\,\mu\,$ – приведенная масса молекулы, $\,E_{V}\,$ – энергия состояния v. Показано, что это выражение является точным для потенциала Морзе. Для реальных

потенциалов для выполнимости этого выражения достаточно, чтобы $\left[(r_v^+ - r_v^-) \sqrt{I_V} \right]^{-1} << 1/2$, где r_v^+ и r_v^- – правая и левая классические точки поворота для уровня v [2]. Анализ полученного выражения показал, что зависимость I_V имеет максимум для некоторого значения v_0 .

Эффективность полученного выражения для ИФ проверена на основе сравнения результатов, полученных с помощью этого выражения (1), с результатами численного решения уравнения Шредингера (2) для колебательных уровней состояния $X^1\Sigma_g^+$ молекулы $^7\mathrm{Li}_2$, используя потенциальную кривую этого состояния из работы [3] (рис. 1). Установлено замечательное согласие результатов этих двух расчетов для $v=0\div38$ (среднеквадратичное отклонение $\overline{\sigma}=0.01\%$). Существенно большие значения $\sigma=0.3\%$ и 1.9% для v=39 и 40 обусловлены погрешностью процедуры численного дифференцирования зависимости E_V от v, входящей в полученное выражение. Максимум I_V имеет место для $v_0=23$ (рис. 1). В то же время проведенный нами численный расчет произведений дисперсий $(\Delta r)_V (\Delta p)_V$ дал максимум этого произведения для v=30 (рис. 2).



Полученные результаты могут быть использованы для оптического контроля колебательных волновых пакетов и молекулярной динамики.

- 1. Wiseman H.M., Milburn G.J. Quantum measurement and control. New York: Cambridge University Press, 2010.
 - 2. Асташкевич С.А. // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.117. №5. С.707.
 - 3. Le Roy R.J., Dattani N.S., Coxon J.A., et al. // J. Chem. Phys. 2009. V.131. №20. P.204309.

ББ АВЕРБУХ

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

ПРЕЛОМЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ S-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВАКУУМ-СРЕДА ИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ДИПОЛЕЙ

Среда из электрических и магнитных диполей может преломлять падающее излучение в обе стороны относительно направления распространения падающей волны либо вообще не преломлять и не отражать падающее на нее излучение заданной частоты.

B.B. AVERBUKH

Pacific state university, Khabarovsk

REFRACTION OF A PLANE S-POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVE ON THE INTERFACE VACUUM-MEDIUM FROM THE ELECTRIC AND MAGNETIC DIPOLES

Medium from the electric and magnetic dipoles can refract the incident radiation in both directions relative to the direction of propagation of the incident wave or do not refract and reflect the incident radiation of a given frequency.

Рассмотрим распространение s - поляризованной электромагнитной волны через диэлектрик, состоящий из периодически расположенных плоскопараллельных монослоев точечных электрических и магнитных диполей. Монослои из электрических диполей (электрические монослои) чередуются с монослоями из магнитных диполей (магнитные монослои). Поля диполей учитываются полностью. Все дипольные монослои лежат в плоскостях xy, пересекающих ось z в точках $z_1, z_2, z_3...$. Расстояния между всеми монослоями по оси z одинаковы и равны a, причем $a << \lambda$, где λ - длина волны излучения. Диполи одного монослоя расположены равномерно (электрические с плотностью N_d и поляризуемостью $A_d = A_d$ — $i A_d$ и магнитные — с плотностью $i A_m$ и поляризуемостью $i A_m = A_m$ — $i A_m$ и неупорядоченно и не взаимодействуют между собой. Распространяющееся вперед внешнее поле рассеивается монослоями

диполей вперед и назад. Каждый дипольный монослой находится в поле излучения всех других монослоев. Нечетные монослои являются электрическими, а четные – магнитными.

Пусть на первый электрический монослой со стороны $z < z_1$ под углом α падает поляризованное вдоль оси x монохроматическое поле $E_0 = E_0 e_0 \exp(i\omega t - i k_0 r)$ с волновым вектором $k_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$, частотой ω и вектором поляризации e_0 . Тогда в среде распространяется поле со средним волновым вектором $\mathbf{K} = (0, K_y = k_{0y}, K_z = k_{0z} + (\phi_d + \phi_m)/2a)$, где $\phi_i = arctg[P_i'/(1-P_i'')], P_i = P_i'-iP_i''= 2\pi N_i A_i k^2/k_{0z}$, (i=d,m) [1].

При $\phi_d+\phi_m=0$ получаем, что $K_z=k_{0z}$ и $K=k_0$. В этом случае преломление отсутствует. Коэффициент отражения от среды равен нулю. Иными словами, поле как бы "не замечает" среду. В случае малых P_d и P_m (т.е. $|P_d|{<<}1$ и $|P_m|{<<}1$) условие $\phi_d+\phi_m=0$ означает, что $N_dA_d+N_mA_m=0$ или $N_dA_d=-N_mA_m$.

При $\phi_d + \phi_m > 0$ имеем $K_z > k_{0z}$, что аналогично обычному преломлению при переходе из менее плотной среды в более плотную, т.е. когда преломленная волна отклоняется от направления падающей волны, прижимаясь к нормали к границе раздела.

При $\varphi_d+\varphi_m<0$ и, кроме того, $k_{0z}>|(\varphi_d+\varphi_m)|/2a$ имеем $K_z< k_{0z}$, что аналогично преломлению при переходе из менее плотной среды в более плотную, т.е. когда преломленная волна отклоняется от направления падающей волны, прижимаясь к границе раздела.

При $\phi_d + \phi_m < 0$ и $k_{0z} < |(\phi_d + \phi_m)|/2a$ имеем $K_z < 0$, что соответствует области существования обратных волн в среде [2].

- 1. Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Распространение плоской s- поляризованной электромагнитной волны в слоистой среде из электрических и магнитных диполей // Сб. трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2011". Т.1. Санкт-Петербург, 2011. С.106-109.
- 2. Авербух И.Б., Авербух Б.Б. Преломление плоской s- поляризованной электромагнитной волны на выходе из среды, состоящей из электрических и магнитных диполей // Сб. трудов VII1 международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2013". Т.1. Санкт-Петербург, 2013. С.75-77.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Е.В. ЮРКОВЕЦ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК

В работе проводится анализ возможности определения оптических констант пленок методом численного решения уравнений, описывающих спектры пропускания и отражения.

E.N. KOTLIKOV, E.V. IURKOVETS

Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USING NUMERICAL METHODS FOR DETERMINATION OF OPTICAL CONSTANTS OF FILMS

Analysis of possibility of determination optical constants of films by numerical method of decision equations describing transmission and reflection spectra is conducted in this work.

Для определения оптических констант пленок (коэффициентов преломления n и коэффициентов поглощения k) наиболее широко используются спектрофотометрические методы. Система уравнений, используемая для анализа спектров, может быть записана в виде:

используемая для анализа спектров, может быть записана в виде:
$$\begin{cases} R(\lambda)_{exper} - R(\lambda)_{theor} = F(n,k,d) \\ T(\lambda)_{exper} - T(\lambda)_{theor} = F(n,k,d) \end{cases} , \tag{1}$$

где $R(\lambda)_{\rm exper}$ и $T(\lambda)_{\rm exper}$ — экспериментальные, а $R(\lambda)_{\rm theor}$ и $T(\lambda)_{\rm theor}$ — теоретические (рассчитанные) значения энергетических коэффициентов отражения и пропускания системы "пленка-подложка" на длине волны λ ; F(n,k,d) — функция качества, по которой оценивают совпадение экспериментального и рассчитанного спектров, d — толщина пленки.

Для нахождения n и k используют различные приближения. При отсутствии поглощения в пленке (k=0) в работе [1] было найдено решение системы (1) при F(n, k, d)=0 для точек в экстремумах пропускания или отражения. В работе [2] предложен метод коррекции спектров пленок на поглощение. Для нахождения оптических констант также используют

различные методы, базирующиеся на минимизации функции качества F(n, k, d) (см. например [3, 4]).

В настоящей работе проанализированы основные причины, препятствующие нахождению однозначного решения.

Отражение пленки R_{13} на подложке с коэффициентом преломления n_3 описывается уравнением [5]

$$R_{13} = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23}\cos\left(-\Delta_{12} + \Delta_{23} - 4\pi n_2 h_2/\lambda\right)}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23}\cos(\Delta_{12} - \Delta_{23} + 4\pi n_2 h_2/\lambda)},$$
 (2)

r — френелевские амплитудные коэффициенты отражения на границах пленка (2) — воздух (1) и пленка (2) — подложка (3).

Для проведения анализа каждой длины волны λ_i спектра методом перебора значений, подбирались такие n_2 , при котором значение R, рассчитанное по формуле (2) будет иметь наименьшее отклонение от экспериментального значения R. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

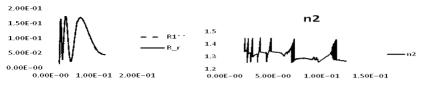


Рис. 1. Результаты при определении коэффициента преломления численным методом

Приведенный анализ показывает практическую невозможность реализации универсального численного метода путем минимизации функции качества, позволяющего находить дисперсионные зависимости оптических констант для всего диапазона длин волн. Для их нахождения требуется применять дополнительные ограничения или приближения.

- 1. Коновалова О.П., Шаганов И.И. Определение оптических констант слабопоглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке // Оптикомеханическая промышленность. 1988. №8. С.39–41.
- 2. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А.. Исследование оптических пленок BaxMg1-x F2 $\,$ // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.117. С.48-52.
- 3. Котликов Е.Н., Терещенко Г.В.. Исследование оптических констант пленок, используемых для синтеза широкополосных просветляющих покрытий // Оптика и спектроскопия. 1997. Т.82. С.653-659.
- 4. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987.
 - 5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

Л.В. ЯБЛОКОВА 1,2 , Д.Л. ГОЛОВАШКИН 1,2

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва

²Институт систем обработки изображений РАН. Самара

РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОГО РАЗНОСТНОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДАЛАМБЕРА И МАКСВЕЛЛА С УЧЕТОМ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ НА GPU

Предложен подход к модификации FDTD-метода, предназначенной для реализации последнего на графическом процессоре. Особенностью авторской разработки является совместное решение уравнений Максвелла (в подобласти с частотной дисперсией) и Даламбера (без таковой), позволяющее снизить требования к объему видеопамяти. В ходе вычислительных экспериментов продемонстрирована эффективность данного приема.

L.V. YABLOKOVA^{1,2}, D.L. GOLOVASHKIN^{1,2}

¹S.P. Korolyov Samara state aerospace university ²Image processing systems institute of the RAS, Samara

IMPLEMENTATION OF THE JOINT DECISION OF THE DIFFERENCE EQUATIONS OF MAXWELL AND D'ALEMBERT, TAKING INTO ACCOUNT THE FREQUENCY DISPERSION ON THE GPU

The approach to the modification of the FDTD method, designed to implement the latest on the GPU. The peculiarity of the author's development is a joint solution of the Maxwell equations (in the sub-region with frequency dispersion) and d'Alembert (without it), which reduces the amount of volume RAM. During numerical experiments demonstrate the efficiency of this method.

В настоящей работе для преодоления ограничения на объем видеопамяти, критичного при реализации FDTD-метода [1] на GPU [2], развивается подход, предложенный в [3, 4], основанный на совместном разностном решении уравнений Даламбера и Максвелла. Модификация алгоритма Yee для GPU с учетом частотной дисперсии представлена далее в нотации языка MatLab [5]:

% перенос сеточных функций в память GPU

 $Hz = \mathbf{gpuArray}(Hz); \ Hy = \mathbf{gpuArray}(\mathbf{Hy}); \ \%$ проекций магнитного поля

 $Ex = \mathbf{gpuArray}(\mathbf{Ex});$ % проекции электрического поля

Eps = **gpuArray(Eps**); % диэлектрической проницаемости % расчёт по алгоритму Yee

for k=1:Nt % перебор слоёв сеточной области по времени

% ht,hy,hz и Qt – параметры сеточной области

% MU_0, EPS_0 – магнитная и электрическая постоянные

 $Hy = Hy - ht*diff(Ex(2:Ny, :), 1, 2)/hz/MU_0; % реализация ф. (2) из [4]$

 $Hz = Hz + ht*diff(Ex(:, 2:Nz), 1, 1)/hy/MU_0; % реализация ф. (2)из [4]$

 $Ex(2:Ny, 2:Nz) = (eps_infty*Ex(2:Ny, 2:Nz)+Psi)./Eps(2:Ny, 2:Nz);$

Ex(2:Ny, 2:Nz) = Ex(2:Ny, 2:Nz) + ... % реализация ф. (9.21) из [1] $ht*(\mathbf{diff}(Hz, 1, 1)/hy - \mathbf{diff}(Hy, 1, 2)/hz)./Eps/EPS_0;$

 $Psi=Ex(2:Ny, 2:Nz)*dchi+exp(-ht/t_0)*Psi; % реализация ф. (9.24) из [1]$

Ex(y0, z0) = sin(2*pi*k/Qt); % задание "жёсткого" источника end:

Ex = gather(Ex); % перенос сеточной функции в ОЗУ

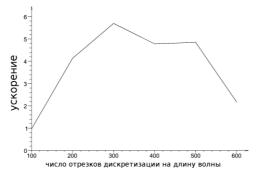


Рис.1. Зависимость ускорения вычислительного процесса от размеров сеточной области

На рис. 1 продемонстрирована эффективность данного алгоритма, позволяющего в 5, 6 раз сократить длительность расчётов за счет использования графического процессора и разностного решения уравнения Даламбера в подобласти без частотной дисперсии.

- 1. Taflove A. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method: 3ed. Boston: Arthech House Publishers, 2005.
 - 2. URL: http://b-calm.sourceforge.net/.
 - 3. Головашкин Д.Л., Яблокова Л.В. // Компьютерная оптика. 2012. Т.36. №4. С.527-533.
- 4. Булдыгин Е.Ю., Головашкин Д.Л., Яблокова Л.В. // Компьютерная оптика 2014. Т.38. №1. С.20-27.
 - 5. http://www.mathworks.com/products/matlab/.

В.А. ЛИТВИНОВА, М.Н. ЛИТВИНОВА, Ю.М. КАРПЕЦ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ВОЛОКНАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ НАВЕДЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

В работе рассчитаны зависимости эффективности преобразования основного излучения во вторую гармонику в полингованных волокнах от приложенного напряжения.

V.A. LITVINOVA, M.N. LITVINOVA, Yu.M. KARPETZ

Far Eastern state transport university, Khabarovsk

THE SECOND HARMONIC GENERATION IN PERIODICALLY POLED SILICA FIBERS

Dependences of the conversion efficiency of the fundamental radiation to the second harmonic in periodically poled silica fibers on the applied voltage are calculated in the paper.

В процессе теплового полинга [1] в кварцевом волокне записывается квадратичная нелинейность. Нелинейно-оптические процессы второго порядка в оптическом волокне описываются эффективной нелинейностью второго порядка $\chi_{\rm eff}^{(2)}$, связанной с нелинейной восприимчивостью третьего порядка [2]:

$$\chi_{\rm eff}^{(2)} = 3\chi_{\rm xxxx}^{(3)} E_{\rm rec} \,, \tag{1}$$

где E_{rec} – записанное электрическое поле.

Эффективность преобразования основного излучения во вторую гармонику определяется выражением:

$$\eta \sim A^2 \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta kx}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta kx}{2}\right)} \right]^2,$$
 (2)

где коэффициент A пропорционален эффективной нелинейности второго порядка $\chi_{\rm eff}^{(2)}$, Δk — расстройка волновых векторов k [3]:

$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_{2\omega} - 2\mathbf{k}_{\omega} = \frac{2\omega(\mathbf{n}_{2\omega} - \mathbf{n}_{\omega})}{\mathbf{c}}, \tag{3}$$

где k_{ω} и $k_{2\omega}$ – волновой вектор основной и второй гармоник, n_{ω} и $n_{2\omega}$ – показатели преломления основной и второй гармоник.

эффективности генерации повышения гармоники необходимо фазовое согласование излучения накачки второй гармоники, что достигается путем создания волокна с периодически наведённой нелинейностью. При этом период структуры и длина волокна определяют диапазон длин волн накачки, в котором выполняется условие квазисинхронизма. При квазисинхронизме эффективность преобразования во вторую гармонику определяется периодом решетки наведенной нелинейности $\Lambda = 2m \cdot L_c$ (m - нечетное число) и длиной волокна.

В электрическом поле в результате электрооптического эффекта происходит изменение показателей преломления кварцевого волокна, что приводит к изменению длины волны, для которой будет выполняться условие синхронизма. При приложении электрического поля к полингованному волокну, изменяется показатель преломления:

$$\Delta n = \frac{1}{2} r n_{\omega}^3 E, \qquad (4)$$

где r – электрооптический коэффициент, E – напряженность поля.

В работе рассчитаны зависимости эффективности преобразования основного излучения во вторую гармонику в полингованых волокнах от приложенного напряжения. При изменении величины приложенного напряжения изменяется показатель преломления, а, следовательно, и длина когерентности. Так, с помощью приложенного напряжения можно увеличивать эффективность генерации второй гармоники излучения лазерного источника. Полученные результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными [4].

- 1. Zhang J., Qian L. $\chi^{(2)}$ evolution in fiber during prolonged thermal poling // Coherent Optical Technologies and Applications. 2008. P.CMC6.
- 2. Wong D. Xu W., Fleming S., Janos M., Lo K.-M. Frozen-in electrical field in thermally poled fibers # Opt. Fib. Tech. 1999. V.5. P.235.
 - 3. Butcher P.N., Cotter D. The elements of nonlinear optics. Cambridge University Press, 1990.
- 4. Canagasabey A., Corbari C., Gladyshev A.V., Liegeois F., Guillemet S., Hernandez Y., Yashkov M.V., Kosolapov A., Dianov E.M., Ibsen M., Kazansky P.G. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers // Optics Letters. 2009. V.34(16). P.2483–2485.

Н.С. БАЛБЕКИН, Н.В. ПЕТРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО РАСПРОСТРОНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДВУМЕРНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ПОЛЯ

В работе рассматриваются особенности моделирования дифракционного распространения двумерных импульсных широкополосных терагерцовых (ТГц) полей, в случае их спектрального разложения на отдельные компоненты. В математической модели используется представление через угловой спектр плоских волн для описания распространения высокочастотных компонент поля из исходной плоскости объекта в удаленную плоскость регистрации, и метод свертки пространственного распределения поля с импульсным откликом системы для передачи низкочастотных составляющих.

N.S. BALBEKIN, N.V. PETROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

THE MODELING PECULIARITIES OF DIFFRACTIVE PROPAGATION OF THE BROADBAND TERAHERTZ TWO-DIMENSIONAL FIELD

The paper discusses the simulation features of diffractive propagation of the twodimensional pulsed broadband terahertz (THz) fields, in the case of spectral expansion on separate components. The mathematical model uses the angular spectrum of plane waves to describe the propagation of high-frequency components of the field from initial object plane to the remote registration plane and convolution of the field at the registration plane with the with the impulse response function for the transmission of low-frequency components.

Задача описания распространения двумерных широкополосных ТГц полей важна при исследовании процессов дифракции ТГц излучения на различных объектах [1], для практического применения ТГц [2], импульсной голографии которое открывает широкие возможности анализа диэлектрических свойств объекта, определение его топологии и т.п. В данной работе рассматриваются особенности моделирования распространения пространственно-временного цуга ТГц волн при его разложении на отдельные спектральные компоненты.

Пусть в плоскости (x', y'), задана вещественная часть напряженности терагерцового поля E(x',y',t). Как правило, она может быть измерена при растровом сканировании по координатам x',y' с помощью электрооптического детектирования. Применяя преобразование Фурье к E(t) в каждой точке x',y' можно получить комплексный спектр излучения:

$$U_{x',y'}(\nu) = \hat{F}_{1D}(E_{x',y'}(t)) = \int E_{x',y'}(t) \exp(-2\pi i \nu) dt, \qquad (1)$$

где символ \hat{F}_{1D} обозначает одномерное преобразование Фурье. Комплексный спектр $U(x',y',v)=|U(x',y',v)|\exp[i\varphi(x',y',v)]$ содержит пространственное распределение как амплитуды |U(x',y',v)| и фазы $\varphi(x',y',v)$ в каждой точке x,y для каждой частоты v. Переходя от представления данных в виде $U_{x,y}(v)$ к $U_v(x',y')$ получим пространственное распределение поля ТГц поля на каждой спектральной компоненте. Математическая модель рассматриваемого метода выглядит следующим образом: Если $v \geq cl/D\Delta x$ (где c — скорость света, l — расстояние от начальной объектной плоскости до удаленной плоскости регистрации, D — линейный размер рассчитываемого поля в исходной плоскости), то используется метод распространения углового спектра плоских волн:

$$U(x,y,l) = \iint_{\infty}^{\infty} U_0(f_x, f_y) \exp\left[2\pi i (f_x x + f_y y)\right] \exp\left[\frac{2i\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right] df_x df_y \tag{2}$$

Здесь $U_0(f_x,f_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-i2\pi (f_x x + f_y y) \right] U(x',y',0) dx' dy' -$ угловой спектр.

Если $v \leq cl/D\Delta x$, то поле U(x,y,l) может быть вычислено с помощью свертки

$$U(x, y, l) = U(x', y', 0) \otimes h(x, y, l)$$
(3)

поля U(x', y', 0) в плоскости l = 0 с функцией импульсного отклика:

$$h(x, y, l) = \frac{\exp\left[\frac{2\pi i r}{\lambda}\right]}{i\lambda r} \frac{l}{r},$$
(4)

где г – расстояние между точками начальной и конечной плоскостей:

$$r = \sqrt{l^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2}.$$
 (5)

- 1. Козлов С.А., Иванов Д.В. // Оптический журнал. 2010. Т.№11(77). С.95-97.
- 2. Petrov N.V., Gorodetsky A.A., Bespalov V.G. // Proc. SPIE. 2013. P. 88460S-88460S-7.

А.О. СЕМКИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ДИФРАКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОННЫХ ФПМ-ЖК СТРУКТУР ПРИ ПЛАВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ УПРАВЛЯЮШЕГО ПОЛЯ

В работе развита теоретическая модель дифракции световых пучков на голографических фотонных структурах, сформированных в композитных фотополимерно-жидкокристаллических (ФПМ-ЖК) материалах, при воздействии электрического поля с плавной пространственной неоднородностью. На основе проведенного численного моделирования показан метод динамической амплитудно-фазовой аподизации голографических фотонных ФПМ-ЖК структур.

A.O. SEMKIN, S.N. SHARANGOVICH

Tomsk state university of control systems and radioelectronics

DIFFRACTION CHARACTERISTICS OF THE PDLC PHOTONIC STRUCTURES WITH SMOOTH SPATIAL INHOMOGENEITY OF THE CONTROL FIELD

In this paper the theoretical model of light beam diffraction on holographic photonic structures, formed in composite polymer-dispersed liquid crystals (PDLC), under the influence of electric field with the smooth spatial inhomogeneity is developed. An amplitude and phase apodization method of holographic photonic PDLC structures is shown based on the simulation results.

Голографические фотонные структуры (ГФС), сформированные в фотополимерных материалах с жидкокристаллической компонентой (ФПМ-ЖК) представляют большой интерес с точки зрения создания на их основе полностью оптических элементов фотоники, управляемых электрическим полем.

В [1] было показано влияние пространственной неоднородности управляющего электрического поля на дифракционные характеристики ГФС, сформированных в ФПМ-ЖК с высокой концентрацией молекул жидкого кристалла. Кроме этого, в [2] был показан метод динамической амплитудно-фазовой аподизации ГФС под действием дискретно пространственно неоднородного управляющего поля.

Целью данной работы является исследование влияния плавной пространственной неоднородности управляющего поля, формируемой особой конфигурацией электродной структуры, на дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК-структур.

Рассмотрена двумерная дифракция Брэгга необыкновенных волн на ГФС (рис. 1a) при воздействии внешнего пространственно неоднородного электрического поля (рис. 1б).

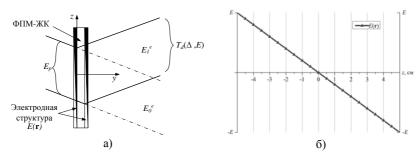


Рис. 1. Двумерная дифракция Брэгга необыкновенных волн на ГФС (a) при воздействии внешнего пространственно неоднородного электрического поля (б)

На рис. 1 $E({\bf r})$ определяет пространственную неоднородность внешнего электрического поля; E_p , E_0^e , E_1^e — падающий, прошедший и дифрагировавший в первый порядок пучки; $T_d\left(\Delta,E\right)$ — зависимость передаточной функции $\Gamma\Phi C$ от относительной расстройки Δ .

Дифракционная характеристика ГФС представлена в виде зависимости передаточной функции от относительной расстройки аналогично [2], полученной путем решения системы уравнений связанных волн [2] с учетом пространственной неоднородности управляющего поля. Показана возможность динамической амплитудно-фазовой аподизации ГФС в условиях пространственно неоднородного управляющего поля.

Работа выполнена в рамках базовой части гос. задания Министерства образования и науки РФ (№2014/225).

- 1. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Взаимодействие световых пучков с голографическими фотонными ФПМ-ЖК-структурами при неоднородном управляющем электрическом поле // Известия вузов. Физика. 2013. Т.56. №9/2. С.21-24.
- 2. Семкин А.О., Шарангович С.Н. Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК структур при сложной дискретной пространственной неоднородности управляющего поля // Доклады ТУСУРа. 2014. №1(31). С.136-140.

М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ ВВОДА

Приводятся результаты экспериментального исследования и оценки достижимых параметров ряда когерентных оптических устройств обработки информации с использованием для ввода сигналов и изображений жидкокристаллической матрицы от видеопроектора.

M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV

Saint-Petersburg state polytechnical university

INVESTIGATION OF COHERENT OPTICAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS WITH LIQUID-CRYSTAL INPUT DEVICE

The results of experimental investigation and evaluation of attainable parameters of a number of coherent optical information processing devices that use the liquid crystal matrix from a video projector for signal and image input are given.

Параметры оптико-цифровых устройств обработки изображений и сигналов в значительной степени определяются устройствами ввода и вывода информации. В последние годы промышленность освоила выпуск жидкокристаллических (ЖК) матриц с электронным управлением для телевидения, видео аппаратуры, телефонии и других систем, которые сразу же привлекли внимание исследователей и теперь являются одними из наиболее перспективных устройств ввода сигналов (изображений) в системы оптической обработки. Хотя эти устройства и не предназначены для когерентных систем, однако вносимые ими неконтролируемые фазовые ошибки в ряде образцов оказываются вполне приемлемыми, что позволяет использовать без применения иммерсии голографической компенсации в когерентных системах. Достоинством этих устройств являются также коммерческая доступность и дешевизна по сравнению со специально разработанными для оптической обработки изделиями [1].

Нами проводились исследования возможности применения ЖК ПМС с электронным управлением в оптическом фурье-процессоре, гибридной

оптико-цифровой системе распознавания изображений, в корреляторе совместного преобразования и в устройствах обработки информации, реализуемых на их основе. В качестве ПМС нами использовался ЖК монитор от видеопроектора с числом разрешимых элементов 1024×768 и частотой обновления информации — 70 кадров в секунду; в качестве многоэлементного фотоприемника — WEB-камера. Ввод сигналов в ПМС, вторичная обработка сигналов и управление устройствами осуществлялось ЭВМ с помощью специальных программ.

Разработанная схема фурье-процессора с ЖК ПМС может найти применение в системах оптического моделирования, в устройствах контроля качества оптических элементов, при анализе компьютерных голограмм и др. В этой схеме нами были исследованы параметры используемого ПМС (глубина модуляции, характеристика управления, качество). оптическое гибридной оптико-цифровой изображений распознавания помощью фурье-процессора формировались спектры входных образов, которые затем распознавались в компьютере по определенному решающему правилу [2]. Исследованная компактная схема коррелятора совместного преобразования, считается перспективной для реализации корреляционного алгоритма, оптимального для широкого класса задач распознавания образов [3]. Применение в таком корреляторе выпускаемого промышленностью ЖК ПМС, делает его готовым устройством для решения многих практических задач [4]. Растровый ввод одномерных сигналов с помощью двумерного ЖК ПМС позволил реализовать схему анализатора свернутого спектра на основе фурье-процессора [5] и корреляционную обработку длинных сигналов в схеме коррелятора совместного преобразования.

- 1. www.holoeye.com.
- 2. Применение методов фурье-оптики /под ред. Г. Старка. М.: Радио и связь, 1988.
- 3. Fyath R.S., Darraj Kh.N. New architectures and algorithm for optical pattern recognition using joint transform correlation technique// Iraq J. Electrical and Electronic Engineering. V.3. No.1. 2007.
- 4. Islam M.N. Taget detection $/\!/$ Technical Seminar of the IEEE, State University of the New York. 2011.
- 5. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Анализатор свернутого спектра с жидкокристаллическим устройством ввода сигналов // Письма в ЖТФ. 2014. Т.40. №15. С.1-5.

Е.Л. БУБИС, И.А. БУДАГОВСКИЙ 1 , А.С. ЗОЛОТЬКО 1 , М.П. СМАЕВ 1 , С.А. ШВЕЦОВ 1,2

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Московский физико-технический институт (государственный университет),

Долгопрудный

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ЗНАКА КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Приведены результаты исследований преобразования изображения непрозрачной структуры в однолинзовой фазоконтрастной схеме с нелинейным фильтром Цернике на основе жидкого кристалла. Реализованы процессы инверсии изображения и частичного исчезновения видимости непрозрачного микрообъекта, имеющие место в плоскости изображения, при субмилливаттных мощностях непрерывного лазерного излучения.

E.L. BUBIS, I.A. BUDAGOVSKY¹, A.S ZOLOT'KO¹, M.P. SMAYEV¹, S.A. SHVETSOV^{1,2}

¹Institute of applied physics of the RAS, Nizhny Novgorod

²Lebedev physical institute of the RAS, Moscow

³Moscow institute of physics and technology, Dolgoprudny

CONTRAST SIGN INVERSION OF IMAGE USING NONLINEAR LIQUID-CRYSTALLINE FILTER

The results of the study of image transformation of an opaque structure in singlelens phase-contrast scheme with nonlinear Zernike filter based on a liquid crystal are presented. Processes of the image inversion and partial visibility disappearance of an opaque microobject taking place in the image plane at submilliwatt power of the cw laser are implemented.

В настоящее время рассматриваются оптические схемы с применением различных нелинейных фильтров [1-3]. В данной работе представлены первые результаты исследования схемы с жидкокристаллическим (ЖК) фильтром, обладающим ориентационной нелинейностью.

Световой пучок твердотельного непрерывного лазера ($\lambda = 473$ нм) проходил через амплитудный микрообъект и фокусировался линзой, в фокальной плоскости которой помещалась гомеотропно ориентированная

ячейка с нематической матрицей ЖКМ-1277, легированной азобензольным красителем КД-1 (0.05% по весу) [4]. Изображение объекта фиксировалось при помощи ПЗС-матрицы (рис. 1). По мере увеличения мощности светового пучка сначала происходило частичное исчезновение изображения объекта (рис. 1б). Далее наблюдалась инверсия контраста изображения (рис. 1в).

При малых световых интенсивностях схема работает как обычная микроскопическая проекционная система. При повышении падающей мощности за счет нелинейности ЖК сильная нулевая гармоника в Фурьеплоскости приобретает фазовый сдвиг $\Delta\theta = 2\pi n_2 I l/\lambda$, где I - интенсивность света, l - толщина ЖК ячейки, n_2 - коэффициент нелинейности. Фазовый $\Lambda\theta \approx \pi/2$ вызывает частичное исчезновение видимости непрозрачного объекта [5], а при $\Delta\theta \approx \pi$ происходит инверсия контраста. Сохранение инвертированного изображения при дальнейшем увеличении мощности, по-видимому, связано с сильным расплыванием пучка нулевой гармоники в плоскости изображения объекта и переходом работы схемы в режим темного поля [6]. В данном случае среда жидкого кристалла работает, как селективный амплитудный экран, частично устраняя опорную волну.

Предложенная оптическая схема может быть использована как фазоконтрастный микроскоп для визуализации прозрачных объектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00784).



Рис. 1. Изображения амплитудного объекта при различных мощностях светового пучка: 0.35 мВт (а), 0.7 мВт (б), 1.0 мВт (в)

- 1. Trevino-Palacios C.G., Iturbe-Castillo M.D., Sanchez-de-la-Llave D., et. al. // Appl. Opt. 2003. V.42. P.5091.
 - 2. Бубис Е.Л., Матвеев А.З. // Квантовая электроника. 2011. Т.41. С.568.
 - 3. Бубис Е.Л., Гусев С.А., Ложкарев В.В. // ПТЭ. 2014. №5. С.113.
- 4. Барник М.И., Золотько А.С., Румянцев В.Г., Терсков Д.Б. // Кристаллография. 1995. Т.40. С.746.
 - 5. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М.: Мир, 1964.
 - 6. Васильев Л.А. Теневые методы. М. Наука, 1968.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, Е.К. ПЕТРОВА, Р.С. СТАРИКОВ, Д.В. ШАУЛЬСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНВАРИАНТНЫЕ ФИЛЬТРЫ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ШУМА И ЭНЕРГИИ КОРРЕЛЯЦИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

Приводятся результаты исследований дискриминационных характеристик инвариантных корреляционных фильтров в условиях реальной постановки задачи инвариантного распознавания: при распознавании изображений, полученных независимо при помощи разных цифровых камер и в разных условиях.

N.N. EVTIKHIEV, E.Yu. ZLOKAZOV, E.K. PETROVA, R.S. STARIKOV, D.V. SHAULSKIY

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

MINACE FILTERS: RECOGNITION OF THE IMAGES RECEIVED FROM VARIOUS INDEPENDENT SOURCES

Here in the work are shown the research results concerning dicriminator curves of invariable correlation filters in the context of real tasks aimed at invariable recognition: during recognition of the images acquired independently using different digital cameras and under different conditions

Были исследованы возможности применения инвариантных корреляционных фильтров с минимизацией шума и энергии корреляции [1-2] для распознавания полученных независимо изображений объектов. Задача распознавания предполагала различение изображений «истинного» объекта от «ложных» трёх типов в условиях пространственного поворота, см. также [3-5]. Использовались независимые наборы изображений каждого из четырёх объектов с 256 градациями серого и размерностью 256х256пикс; два набора по 358 изображений получены независимо с помощью цифровой зеркальной фотокамеры и один из 356 изображений получен с помощью веб-камеры. Синтез фильтров выполнялся аналогично [3-5].

Были исследованы следующие варианты:

- 1) качестве обучающего и распознаваемого наборов используется один и то же комплект фотографий, сделанных цифровой зеркальной камерой (вариант «C1=C1»);
- 2) в качестве обучающего и распознаваемого использованы разные комплекты фотографий, сделанные одной цифровой зеркальной камерой, (вариант «C1=C2»), в этом случае возможны небольшие отличия по ракурсу одних и тех же объектов в обучающем и распознаваемом наборах:
- 3) обучаемый и распознаваемый наборы сделаны разными камерами (цифровая зеркальная и веб-камера) (вариант «C1=W»).

Для перечисленных вариантов были проведены исследования по распознаванию изображений объектов на равномерном фоне, а также помещённых на шумовой фон. В последнем случае использовались три типа шумового фона, отличающиеся по близости пространственного спектра к спектру распознаваемых объектов.

В случае распознавания объектов на равномерном фоне получены следующие результаты:

- для варианта «С1-С1» вероятность ошибки менее 0,01%,
- для варианта «С1-С2» возможно достижение вероятности ошибки менее 0,1%,
 - для варианта «С1-W» вероятность ошибки не превысила 18%.

При распознавании изображений объектов на шумовом фоне существенным фактором является также близость пространственных спектров шума и объекта; в этом случае получены следующие результаты:

- для варианта «С1-С1» вероятность ошибки менее 0,01%,
- для варианта же «С1-С2» вероятность ошибки не превысила 2% в случае близких спектров объекта и фона и находится в пределах 0,5%, в случае, когда спектры объекта и фона отличаются значительно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

- 1. Ravichandran G., Casasent D. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl.Opt. 1992. V.31. No.11. P.1823-1833.
- 2. Casasent D., Patnaik R. Automated synthesis of distortion-invariant filters: AutoMinace // Proc.SPIE. 2006. V.6384. P.638401.
- 3. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.
- 4. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. MINACE filter realization as computer generated hologram for 4-f correlator" // Proc. SPIE. 2013. V.8748. P.87480O.
- 5. Shaulskiy D.V., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. MINACE filter: variants of realization in 4-f correlator // Proc. SPIE. 2014. V.9094. P.90940K.

Γ .С. КАЛЕНКОВ 1 , С.Н. МИРОНОВ 2 , А.Е. ШТАНЬКО

Московский государственный технологический университет «Станкин» ¹ООО «Микрохоло», Москва

²Московский государственный университет приборостроения и информатики

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ВЫСОКОАПЕРТУРНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Предложена лучевая модель расчета аберраций внеосевого параболического зеркала. Приведены результаты эксперимента, подтверждающего численный расчет.

G.S. KALENKOV¹, S.N. MIRONOV², A.E. SHTANKO

Moscow state university of technology (Stankin)

¹Microholo Ltd., Moscow

²Moscow state university of instrument engineering and informatics

HIGH-NUMERICAL APETURE OPTICS WAVEFRONT ABERRATIONS RAY TRACING SIMULATION

Off-axis parabolic mirror aberration ray tracing model is purposed. Experimental results verifying the calculus validity are presented.

Зеркальная оптика широко используется в оптических системах, в особенности в УФ и ИК-диапазонах излучения. Во многих приборах применяют внеосевые параболические зеркала, обеспечивающие развязку падающего и отраженного пучков. Аберрации таких зеркал (особенно существенные при большой апертуре) ограничивают их применение. В работах [1,2] в общем виде исследованы аберрации внеосевых параболических зеркал. Показано наличие астигматизма и комы. Целью настоящего исследования являлось создание математической модели, позволяющей наглядно представить волновые аберрации внеосевого параболического зеркала с заданными параметрами.

Модель является лучевым представлением распространения лазерного излучения и описывает распространение пучка лучей из точечного источника до внеосевого параболоида, отражение на нём, и распространение до заданной сетки точек в плоскости регистрации.

Распространение каждого луча в пучке рассчитывается по законам геометрической оптики. Вычисляется полная длина каждого луча от источника ДΟ плоскости регистрации, что позволяет построить распределение фазы волны $\varphi(u,v)$ в этой плоскости. Как известно, при расположении источника В фокусе параболоида, параболоидом волна является плоской. При смещении источника из фокуса волновой фронт искажается. На рис. 1 приведено распределение фазы волны в плоскости регистрации, соответствующее смещению источника по трем координатным осям.

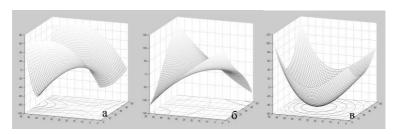


Рис. 1. Распределение фазы в плоскости регистрации, соответствующее смещению источника из фокуса на 50 мкм: по оси x (а), по оси y (б), по оси z (в). Фокальная длина f=25.4 мм, диаметр зеркала D=25.4 мм, длина волны $\lambda=0.555$ мкм

Достоверность данных, получаемых с помощью описанной модели, была подтверждена экспериментально путем интерференционного измерения волновых аберраций внеосевого параболического зеркала. По нашему мнению, представленная модель может быть использована в системах адаптивной оптики или голографической коррекции аберраций.

- 1. Arguijo P., Scholl M.S., Paez Gonzalo Diffraction patterns formed by an off-axis paraboloid surface // Applied Optics. 2001. V.40. No.17. P.2909-2916.
- 2. Arguijo P., Scholl M.S. Exact ray-trace beam for an off-axis paraboloid surface // Applied Optics. 2003. V.42. No.16. P.3284-3289.

А.Р. ЗАКАРЕЕВА, С.Н. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СНИМКОВ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ШУМЫ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕГИСТРИРУЮЩИХ КАМЕР

В работе предложена и апробирована методика моделирования снимков с учётом шумовых и радиометрических характеристик регистрирующих фото- и видеокамер. Получены оценки сигнал/шум полученых модельных снимков.

A.R. ZAKAREEVA, S.N. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

METHOD OF SHOTS MODELING USING NOISES AND RADIOMETRIC PARAMETERS OF REGISTERING CAMERAS

In this paper we proposed and tested method of modeling of shots. It takes into account noise and radiometric characteristics of registering photo- and videocameras. Estimates of the signal-to-noise ratios of modeled shots were obtained.

Шумы цифровых фото- и видеокамер делятся на два вида: случайные по времени (временной шум) и псевдослучайные по пикселям фотосенсора (пространственный шум) компоненты [1]. Временный шум имеет две составляющие: темновую и световую. Пространственные шумы также можно разделить на две составляющие: неоднородности темнового сигнала и фоточувствительности пикселей.

Шумы и конечность динамического диапазона фото- и видеокамер являются одними из главных ограничений в различных задачах. Так, для применений цифровой голографии необходимо знать ожидаемое качество восстановления изображений, обусловленное характеристиками используемой камеры. Это позволит оценить влияние этих параметров на качество восстановления и определить область задач, решаемых камерами различных типов. В [2] кратко описана методика моделирования снимков использованием радиометрических шумов И характеристик регистрирующих камер, однако применительно только к восстановлению цифровых голограмм Френеля. В данном докладе методика апробирована не только на голографии, но и на снимках любого содержания. Для моделирования процесса регистрации использовались в том числе измеренные в [3-5] параметры серийных камер 4 типов: технического зрения PixeLink PL-B781F бытовой Canon EOS 400D, видеонаблюдения с аналоговым выходом Watec LCL-902C и научной MegaPlus II ES11000.

Темновые и световые пространственные, а также темновые временные шумы моделировались как подчиняющиеся распределению Гаусса; а световые временные — распределению Пуассона. На рис. 1а приведён результат моделирования снимка, сделанного фотоприёмником с высоким уровнем шума, на рис. 16 с более низким, а на рис. 1в с фотоприёмника, имеющего характеристики научной камеры MegaPlus II ES11000. Отношения сигнал/шум полученных изображений равны 10 Дб (рис. 1а), 20 Дб (рис. 1б) и 42 Дб (рис. 1в).

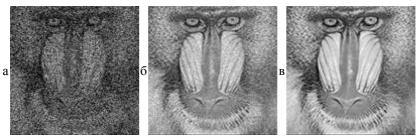


Рис. 1. Примеры модельных снимков. Отношения сигнал/шум составляют $10\ \mathrm{Д}6\ (\mathrm{a}), 20\ \mathrm{Д}6\ (\mathrm{б})$ и $42\ \mathrm{Д}6\ (\mathrm{g})$

Предложенная методика может использоваться для обоснованного выбора камер при решении различных научных и прикладных задач.

- 1. Singh A., Singh K.K. (2012). Digital Image Processing. Umesh Publications.
- 2. Евтихиев Н.Н., Стариков С.Н., Черемхин П.А. Оценка влияния динамического диапазона и шумов регистрирующих камер на качество цифровых голограмм // Оптический журнал. Т.80. №5. 2013. С.53-64.
- 3. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A., Krasnov V.V. Measurement of noises and modulation transfer function of cameras used in optical-digital correlators // Proceedings of SPIE. 2012. V.8301. P.830113.
- 4. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Krasnov V.V., Rodin V.G. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types // Opt. Eng. 2014. V.53. No.10. P.102107.
- 5. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Kurbatova E.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Estimation of number of resolvable signal levels of photo- and videocameras // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V.536. P.012023.

В.В. КРАСНОВ, Р.С. СТАРИКОВ, С.Н. СТАРИКОВ, И.Ю. ЭРЬКИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛЮКТУАЦИЙ ФАЗЫ В ЖК ПВМС НА КАЧЕСТВО ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КИНОФОРМОВ

Предложена и апробирована методика моделирования влияния флюктуаций фазы в ЖК ПВМС на качество оптического восстановления киноформов.

V.V. KRASNOV, S.N. STARIKOV, R.S. STARIKOV, I.YU. ERKIN National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

MODELING OF EFFECT OF LC SLM PHASE FLUCTUATIONS ON KINOFORMS OPTICAL RECONSTRUCTION QUALITY

Method of modeling of effect of LC SLM phase fluctuations on kinoforms optical reconstruction quality is presented.

Фазовые жидкокристаллические (ЖК) пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) широко используются в различных областях науки: в дифракционной оптике, цифровой голографии и др. Для многих научных и практических применений требуется временная стабильность фазовой модуляции. В большинстве современных модуляторов используется цифровая адресация сигналов, что позволяет реализовывать компактные контроллеры при большом количестве пикселей. Однако, при этом неизбежны флюктуации фазы, вызванные ступенчатым профилем **управляющего** напряжения [1-4]. приводит Это дифракционной эффективности и качества оптического восстановления отображаемых на ПВМС дифракционных оптических элементов (ДОЭ). флюктуаций Моделирование влияния на качество восстановления выводимых на ПВМС ДОЭ позволяет знать заранее, до установки или покупки ПВМС, пригоден ли конкретный ПВМС для отображения определенных типов ДОЭ. Это особенно актуально в случае сложных многоградационных фазовых ДОЭ таких как киноформы.

В работе описывается моделирование оптического восстановления киноформов на фазовом ЖК ПВМС «HoloEye PLUTO VIS». Тем не менее, методика универсальна и подходит не только для киноформов, но и для

других типов ДОЭ. Для моделирования необходимо иметь зависимость величины фазового сдвига от уровня сигнала и времени от начала кадра лля моделируемого ПВМС. Зависимость может быть получена стандартным двухлучевым интерференционным методом использованием синхронизации регистрирующей камеры и ПВМС [3-4]. Перед моделированием влияния флюктуаций на качество оптического восстановления было проведено измерение этой зависимости. Уровень сигнала варьировался от 0 до 255 с единичным шагом, время от начала кадра - от 0 до 17 мс с шагом 0,5 мс. Моделирование влияния флюктуаций фазы в ЖК ПВМС на качество оптического восстановления киноформов проводилось следующим образом. Основываясь полученной зависимости, для каждого времени от начала кадра создается своя «калибровочная» таблица искажений, связывающая уровень поданного на пиксель сигнала и обеспечиваемый им моментальный фазовый сдвиг. Всего получается 35 таких таблиц. Для каждого времени от начала кадра в соответствии со своей таблицей выполняется пересчёт ДОЭ, в результате чего получается искаженный ДОЭ, соответствующий отображаемому ПВМС в конкретный момент времени. Далее численно восстанавливалось изображение c полученного ЛОЭ. Каждое такое изображение соответствует «мгновенному» оптическому восстановлению экспозиции менее 1 мс. Далее восстановленные изображения усредняются в одно изображение, которое соответствует оптически восстановленному с временем регистрации, большим длительности кадра (16,7 мс).

Приведены полученные оценки влияния флюктуаций фазы ЖК ПВМС и результаты сравнения оптического и модельного восстановления изображений с киноформов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 13-07-00395.

- 1. Lizana A., Moreno I., Marquez A., Iemmi C., Fernandez E., Campos J., Yzuel M. Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive optics // Optics Express. 2008. V.16. P.16711-16722.
- 2. Zwick S., Haist T., Warber M., Osten S. Wave front generation using a phase-only modulating liquid-crystal based micro-display with HDTV resolution // Proceedings of SPIE. 2007. V.6584. P.65840E.
- 3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Reduction of phase temporal fluctuations caused by digital voltage addressing in LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" for holographic applications // Proceedings of SPIE. 2014. V.9006. P.900615.
- 4. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov R.S., Starikov S.N. Measurement of characteristics and phase modulation accuracy increase of LC SLM "HoloEye PLUTO VIS" // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.536. P.012011.

3.А. СИДЯКИНА

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВЛИЯНИЕ ПОБОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрено влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой.

Z.A. SIDYAKINA

Penza state university of architecture and construction

INFLUENCE OF ADVERSE DIFFRACTION ORDERS ON THE QUALITY OF IMAGE

Adverse impact of the diffraction orders on the quality of the image formed by refractive-diffractive optical system is investigated.

Включение в оптическую систему, состоящую из рефракционных линз одиночной дифракционной линзы (ДЛ) позволяет существенно упростить конструкцию системы и одновременно получить высокие оптические характеристики. Однако при использовании ДЛ появляются побочные дифракционные порядки, которые оказывают влияние на качество Для рассмотрения их влияния была изображения. использована пластмассовая гибридная асферическая линза (ГАЛ) Plastic Hybrid Aspheric Lens No 5-999, серийно производимая фирмой Edmund Optics. ГАЛ выполнена из оптической пластмассы Zeonex E48R и имеет асферическую сферическую преломляющие поверхности. асферической поверхности имеется рельефно-фазовая пилообразная микроструктура ДЛ. Для оценки дифракционной дифракционная эффективности (ДЭ) В различных дифракционных использовалось выражение, полученное в скалярном приближении [1]:

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin[\pi(\Delta l/\lambda - m)]}{\pi(\Delta l/\lambda - m)} \right\}^2,$$

где λ - длина волны падающего на структуру света, Δl - приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля, и в нашем случае $\Delta l = h(n-1)$, n - показатель преломления пластмассы на длине волны λ . Значения ДЭ рассматривались на 3-х длинах волн

 $(\lambda_{\min} = \lambda_F = 0.48613 \,\mathrm{mkm}, \quad \lambda_{\max} = \lambda_C = 0.65626 \,\mathrm{mkm}, \quad \lambda_{HeNe} = 0.6328 \,\mathrm{mkm}),$ причем порядки выше пятого в анализ не были включены, т.к. их энергетический вклад пренебрежимо мал.

Оценка качества изображения протяженного объекта производилась частотно-контрастной характеристике (ЧКХ), вычислявшейся компьютерной программой Zemax, а также экспериментально с тест-объекта – штриховой использованием миры ЛКТБ «Светлана». Как видно из изображения миры, наблюдаемого на экране компьютера (рис. 1), хорошо разрешаются шпалы элемента 6 группы 0. Пространственная частота первой гармоники В ЭТОМ $N_{0.6} = 178$ лин/мм (ширина шпал и промежутков между ними 2,81 мкм).

Шпалы элемента 1 группы 1 разрешаются уже немного хуже. Пространственная частота первой гармоники в этом элементе $N_{1.1} = 200$ лин/мм (ширина промежутков между ними 2,5 мкм). Полихроматическая ЧКХ, учитывающая все дифракционные порядки (вплоть до $m=\pm 5$), лает значения контраста, которые практически отличаются. не Объясняется это тем, что в связи с ощутимой ДЛ оптической силой изображения, которые дают побочные дифракционные порядки настолько расфокусированы и в совокупности с низкой ДЭ в этих порядках создают очень

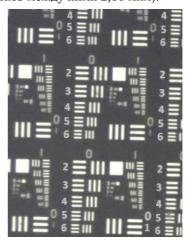


Рис. 1. Вид штриховой миры

слабый и практически равномерный фон, практически не влияющий на контраст сфокусированного изображения. Таким образом, на основании данных результатов можно сделать вывод, что побочные дифракционные порядки пилообразной рельефно-фазовой структуры не являются препятствием для использования ДЛ в объективах подобных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образовании и науки $P\Phi$ в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Грейсух Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ёжов Е.Г., Степанов С.А. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т.106. №4. С.694-699.

П.А. ЧЕРЁМХИН, В.В. КРАСНОВ, Е.А. КУРБАТОВА, Р.С. СТАРИКОВ, С.Н. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ СНИМКОВ С ПОМОЩЬЮ ПОРТРЕТОВ СВЕТОВЫХ И ТЕМНОВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ШУМОВ ФОТОСЕНСОРОВ КАМЕР

Для повышения отношения сигнал/шум регистрируемых снимков предложено использовать портреты световых и темновых пространственных шумов фотосенсоров камер. По результатам численных экспериментов получено, что при компенсации портретов пространственных шумов можно ожидать увеличения отношения сигнал/шум до 50 раз по сравнению с одиночным снимком.

P.A. CHEREMKHIN, V.V. KRASNOV, E.A. KURBATOVA, R.S. STARIKOV, S.N. STARIKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

METHOD OF INCREASE OF SIGNAL-TO-NOISE RATIO OF REGISTERED SHOTS USING DARK AND LIGHT SPATIAL NOISE PORTRAITS OF CAMERA'S PHOTOSENSOR

Method of increase of the signal-to-noise ratio of shots by use of light and dark spatial noise portraits of camera's photosensor was proposed. According to the results of numerical experiments, it was found that the signal-to-noise ratio can be increased up to 50 times compared to that one of a single image.

Наиболее распространенным методом повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) регистрируемых фото- и видеокамерами изображений является метод многократной экспозиции. При его использовании последовательно во времени выполняется регистрация нескольких кадров одной и той же сцены и вычисляется среднее по кадрам изображение. метол позволяет уменьшить уровень временных шимов пропорционально квадратному корню ИЗ числа кадров [1] следовательно, увеличить ОСШ по сравнению с одиночным снимком. При этом ОСШ будет ограничено величиной пространственных шумов.

В [2] представлена численная, а в [3] экспериментальная апробация метода увеличения ОСШ путём компенсации пространственных шумов с

использованием портрета световых пространственных шумов (ПСПШ) сенсора. ПСПШ – массив чисел, равных относительным отличиям фоточувствительностей отдельных пикселей от средней по всему сенсору.

В данном докладе для дальнейшего увеличения ОСШ предлагается использовать не только ПСПШ, но и портрет темновых пространственных шумов (ПТПШ) фотосенсора. ПТПШ — массив значений неоднородностей темнового сигнала пикселей сенсора. Разработанную методику можно описать в следующем виде. Вначале регистрируются несколько снимков одной сцены, усредняются в один массив $I_0(x,y)$ путём применения метода многократной экспозиции. Применяется компенсация ПТПШ и ПСПШ:

$$I(x,y) = \frac{I_0(x,y) - DSNU(x,y)}{1 + PRNU(x,y)}.$$
 (1)

где I(x,y) — полученный снимок с увеличенным ОСШ; PRNU(x,y) — ПСПШ фотосенсора; (x,y) — дискретные координаты пикселей; DSNU(x,y) — ПТПШ пикселей фотосенсора. В случае знания точных портретов, ОСШ ограничивается только шумом квантования. На практике в случае съёмки сотен снимков ошибка измерения портретов выше шума квантования.

В результате численных экспериментов получено, что использование компенсации пространственных шумов в комбинации с покадровым усреднением может значительное vвеличение ОСШ. При дать компенсации точно измеренными портретами можно ожидать увеличения ОСШ до 50 раз по сравнению с одиночным снимком, а при компенсации приближёнными (погрешность 10 %) портретами максимальное увеличение ОСШ может составлять до 20 раз.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного (РНФ), грант № 14-19-01751.

- 1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing, Pearson Prenctice Hall, 2007.
- 2. Евтихиев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А, Япушко О.А. Получение портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры для идентификации цифровых камер и увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений // Наукоёмкие технологии. 2013. №7. С.55-64.
- 3. Evtikhiev N.N., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Increasing signal-to-noise ratio of registered images by using light spatial noise portrait of camera's photosensor // Proceedings of SPIE. 2014. V.9025. P.90250X.

В.Н. БОРИСОВ, А.В. ВЕНИАМИНОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД МОДУЛЯЦИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗ КОНТУРОВ УГЛОВОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ В ПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ С ФЕНАНТРЕНХИНОНОМ

Вклады амплитудной и фазовой модуляции в объёмных голограммах-решётках, записанных в полимерном материале с фенантренхиноном (Φ X), были рассчитаны по измеренным контурам угловой селективности. Установлено соответствие формы контуров селективности теоретическому описанию, что даёт возможность определения параметров решёток, записанных в полимерном материале. Показано, что до усиления голограмм (диффузионного перемешивания молекул) голограммы являются амплитудно-фазовыми для света с длиной волны в области поглощения Φ X, а после проявления — фазовыми. Вне полосы поглощения голограммы являются фазовыми как до, так и после проявления. Значение амплитуды модуляции показателя преломления находится в пределах от 5×10^{-6} до 10^{-4} , а амплитуда модуляции коэффициента поглощения доходит до 140 м^{-1} .

V.N. BORISOV, A.V. VENIAMINOV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

DETERMINATION OF REFRACTIVE INDEX AND ABSORBANCE MODULATION AMPLITUDES FROM ANGULAR SELECTIVITY OF HOLOGRAMS IN POLYMER MATERIAL WITH PHENANTHRENEQUINONE

Amplitude and phase contributions to mixed volume holographic gratings in polymer material with phenanthrenequinone (PQ) were extracted from measured contours of angular selectivity. The shape of the contours correlates to the theoretical description. This fact allows us to use this theory to determine the parameters of the gratings recorded in the polymer material. It is shown that before the development of hologram (diffusion mixing of the molecules), it is to be both amplitude and phase in the case of readout using a light within the absorption band of PQ and beside the absorption band of PQ hologram maintains the phase nature both before and after. The value of refractive index modulation amplitude is ranging from 5×10^{-6} to 10^{-4} and the value of absorbance modulation amplitude is up to $140~\text{m}^{-1}$.

В данной работе представлены результаты исследования вкладов модуляции показателя преломления и коэффициента поглощения в дифракционную эффективность голограмм-решеток, сформированных в полимерном материале за счёт фотохимического присоединения молекул фенантренхинона (ФХ) к полимерным цепям и диффузионного перемешивания непрореагировавших молекул [1].

Голограммы были зарегистрированы при помощи непрерывного излучения твердотельного лазера диодной накачкой (532 HM).проявления за счёт диффузии ФХ их дифракционная эффективность достигала Значения амплитуд модуляции показателя преломления и коэффициента поглощения на 450, 473, 532 и 633 нм до и диффузионного проявления после голограмм были определены в результате аппроксимации данных измерений как параметры уравнений, описывающих контуры угловой селективности нулевого и первого порядков дифракции [2, 3].

Для непроявленных амплитуднофазовых решёток характерны асимметричные зависимости пропускания эффективности (дифракционной порядка) падения OT угла максимумом, сдвинутым по отношению к углу Брэгга (смещённый эффект Бормана [4]). После диффузионного проявления решётки приобретают фазовый характер.

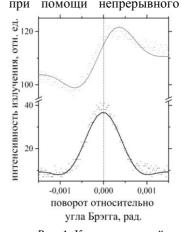


Рис. 1. Контуры угловой селективности нулевого (сверху) и первого (внизу) порядков дифракции, измеренные на длине волны 450 нм непосредственно после записи голограммы

- 1. Veniaminov A.V., Mahilny U.V. Holographic Polymer Materials with Diffusion Development: Principles, Arrangement, Investigation, and Applications // Optics and Spectroscopy. 2013. V.115. No.6. P.906-930.
- 2. Martin Fally, Mostafa Ellabban, and Irena Drevenšek-Olenik. Out-of-phase mixed holographic gratings: a quantative analysis // Optics Express. 2008. V.16. No.9. P.6528-6536.
- 3. Martin Fally, Mostafa Ellabban, and Irena Drevenšek-Olenik. Out-of-phase mixed holographic gratings: a quantative analysis: erratum // Optics Express. 2009. V.17. No.25. P.23350.
- 4. Carretero L., Madrigal R.F., Fimia A., Blaya S.. Study of angular responses of mixed amplitude-phase holographic gratings: shifted Borrmann effect // Optics Letters. 2001. V.26. No.11. P.786-788.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР, Д.Ф. ЧЕРНЫХ

Физико-технический институт им. $A.\Phi$. Иоффе PAH, Санкт-Петербург 1 Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Приведен анализ измерений поверхностного рельефа голографических диффузоров на фотоэмульсиях ПФГ-01, полученных с помощью мультиплексных голограмм. Подтверждается существенное влияние разных методов преобразования амплитудных голографических структур в рельефно-фазовые на характеристики диффузоров.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A. MAURER, D.F. CHERNYKH

Ioffe physical-technical institute of the RAS, Saint-Petersburg

¹Saint-Petersburg state polytechnical university

INFLUENCE OF METHODS OF FORMATION RANDOM RELIEF-PHASE HOLOGRAPHIC STRUCTURES ON THEIR CHARACTERIZATIONS

The analysis of the measurements of a holographic diffusers surface relief on PFG-01 emulsions obtained using multiplexed holograms was made. The significant effect of different transformation methods of the amplitude holographic structures in relief-phase on the optical characteristics of the diffusers was confirmed.

Для создания высокоэффективных диффузоров, полученных с помощью мультиплексной голограммы [1], нами использовалось преобразование амплитудной голографической записи в рельефнофазовую с помощью методов фотохимической обработки, включающих либо дубящее отбеливание [2], либо воздействие коротковолнового УФизлучения на желатин фотоэмульсионного слоя (метод ВКУФ) [3].

Отбирались и исследовались образцы случайных рельефно-фазовых минимальным значением структур, обладающих интенсивности нерассеянной (нулевой компоненты света порядок дифракции), прошедшего через диффузор. С помощью микроинтерферометра Линника профилометра XP-1 «Ambios» фирмы измерялся профиль поверхностного рельефа выбранных образцов диффузоров, а также

регистрировались индикатрисы рассеяния света. Отмечено значительное отличие в средней толщине эмульсионного слоя после применения методов ВКУФ ($T = 1.4 \div 3.35$ мкм) и дубящего отбеливания ($T = 4.5 \div$ 6,35 мкм), что согласуется с физической сутью методов обработки, связанных либо с деструкцией и удалением желатина (метод ВКУФ), либо со структурированием желатина (дубящее отбеливание). Выявлено существенное различие между индикатрисами рассеяния для голограммдиффузоров, полученных c помощью двух вышеуказанных альтернативных методов. Независимо от величины угла схождения пучков записи мультиплексной голограммы полуширина индикатрисы рассеяния диффузоров, полученных при использовании отбеливателя R-10 в 1,4-1,7 раз больше, чем в случае применения метода ВКУФ. Это обстоятельство связано с различием пространственночастотных характеристик обработанных разными способами голограммдиффузоров. Процесс формирования фазового рельефа с помощью избирательного дубления в R-10 приводит к подавлению низких пространственных частот [2], что подтверждается микрофотографиями поверхности одного и того же образца диффузора, изготовленного двумя упомянутыми методами. Характерный размер элементов структуры поверхности при отбеливании в R-10 значительно меньше по сравнению со случайными структурами, сформированными методом ВКУФ.

Анализ экспериментальных характеристик поверхностного рельефа голографических структур, созданных с помощью мультиплексных голограмм, показал, что применяемые в работе методы фотохимической обработки фотоэмульсионных слоев способны обеспечить глубину рельефа, необходимую для получения высокоэффективных рассеивателей с малой величиной нулевого порядка дифракции. Такие диффузоры имеют преимущество по сравнению с ранее предложенным методом изготовления диффузоров на основе матового стекла [4]. Показано, что структура поверхности диффузора сохраняет частичную регулярность. Это позволяет существенно снизить долю нерассеянной компоненты до сотых долей процента в более широком диапазоне изменения оптической плотности серебряного изображения амплитудной голограммыдиффузора, что значительно упрощает процесс изготовления диффузоров на практике.

- 1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // ЖТФ. 2014. Т.84. С.112-116.
- 2. Smith .M. Photographic Relief Images // J. Opt. Soc. Am. 1968. V.58. Not. P.533-539.
- 3. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т.70. №2. С.45-49.
- 4. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. // Оптический журнал. 2007. Т.74. №9. С.56-61.

В.В. ЛЕСНИЧИЙ^{1,2}, Н.В. ПЕТРОВ², П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

²Университет Фрайбурга, Фрайбург-в-Брайсгау, Германия

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В работе описаны два метода получения лучших по качеству цветных цифровых голограмм, чем в представленных ранее работах, при использовании трех лазеров с разными длинами излучения.

V.V. LESNICHII^{1,2}, N.V. PETROV¹, P.A. CHEREMKHIN

IMPROVEMENT OF QUALITY OF COLOR DIGITAL HOLOGRAMS

This paper describes two methods of obtaining of color digital holograms with better quality than in earlier works using three lasers with different wavelengths.

Цветная цифровая голография стала выделяться в самостоятельный раздел голографии с начала 2000-х гг. Одна из первых работ была представлена в [1]. Регистрировались три цифровые голограммы, каждая с использованием лазеров с различными длинами волн излучения: 442, 538 и 636 нм. Далее три изображения восстанавливались и преобразовывались в один цветной снимок. Этот метод развивался, например, в [2-4].

В данном докладе представлены два варианта [5-6] получения лучшего по качеству цветного изображения, чем в представленных статьях, если записываются цифровые голограммы с использованием трех лазеров с разными длинами излучения. Пусть голограмму регистрирует камера с байеровским массивом светофильтров. Используются три лазера с длинами волн излучения, а) соответствующими синей, зеленой и красной части видимого спектра (метод №1 [5]), б) спектральные отклики для которых в смежных цветовых каналах камеры будут минимальны (метод №2 [6]). Одновременно записываются 3 цифровые голограммы при

использовании этих 3 длин волн излучения. В методе №1 находятся весовые коэффициенты из перемножения мощности излучения лазера с определенной длиной волны излучения на величину спектрального отклика отдельного цветового канала матрицы на излучение с этой же длиной волны. Учитывая полученные весовые коэффициенты возможно получение наилучшего по качеству цветного изображения без их дополнительного перебора, который был необходим в статьях [1-2]. В обоих метолах лалее численно восстанавливается изображение, интерполируется и получается цветное объёмное изображение объекта. В качестве примера применения метода №2 рассмотрим измеренные в [5] спектральные отклики камеры Canon EOS 1000D. Они приведены на рис.1; вертикальными линиями обозначены т длины волны излучения для записи цветной голограммы, выбранные согласно предложенному методу.



Рис.1.Спектральные отклики цветовых каналов камеры Canon EOS 1000D и выбор трёх лучших длин волн излучения для записи цветной цифровой голограммы [5]

Использование указанных длин волн позволит снизить зашумлённость голограммы до 10 раз за счёт уменьшения засветки из смежных каналов.

- 1. Yamaguchi I., Matsumura T., Kato J. Phase-shifting color digital holography // Opt. Lett., 2002. V.27. №13. P.1108-1110.
- 2. Ferraro P., et. al. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms // Opt. Lett. 2004. V.29. №8. P.854-856.
- 3. Xia P., et. al. Improvement of color reproduction in color digital holography by using spectral estimation technique // Appl. Opt. 2011. V.50. №34. P.H177-H182.
- 4. Memmolo P., Finizio A., Paturzo M., Ferraro P. An alternative reconstructing method in color holography based on digital holograms stretching // Proc. SPIE.. 2012. V.8430. P.843005.
- 5. Лесничий В.В., Петров Н.В., Черёмхин П.А. Методика измерения спектральных характеристик матричных приемников любительских и профессиональных фотокамер и их применение для задач цифровой голографии // Опт. и спектр. 2013. Т.115. №4. С.633-643.
- 6. Cheremkhin P.A., Lesnichii V.V., Petrov N.V. Use of spectral characteristics of DSLR cameras with Bayer filter sensors // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V.536. P.012021.

С.А. САВОНИН¹, П.В. РЯБУХО¹, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского ²Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ ПОСТОБРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Применение процедуры ступенчатой интерполяции голограммы приводит к существенному уменьшению размеров спеклов восстанавливаемого изображения объекта и увеличению контраста полос голографической интерферограммы.

S.A. SAVONIN¹, P.V. RYABUKHO¹, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹Saratov state university named after N.G. Chernyshevskiy ²Institute of precision mechanics and control of the RAS, Saratov

INTERPOLATION POST-PROCESSING OF DIGITAL FOCUSED-IMAGE HOLOGRAMS

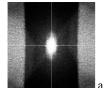
Application the step-in-interpolation procedure of holograms leads to significant reduction the speckle size in the reconstructed object image and increases the contrast of the fringes in the holographic interferograms.

Метод цифровой голографической интерферометрии позволяет использовать процедуры численной коррекции в целях повышения качества формируемых голографических интерферограмм, качественно и количественно отражающих поле микросмещений поверхности объекта в результате его микродеформации под действием нагрузки.

Цифровые голограммы формируются путем дискретизации элементах светочувствительной матрицы непрерывного отдельных оптического поля, попадающего на матрицу в процессе записи. В [1, 2],соответствии с теоремой Котельникова повышение исходного поля дискретизации непрерывного позволяет расширения спектрального окна цифровой представления спектра голограммы и сдвига его границ в области высоких частот.

дискретизации Аппаратный ПУТЬ повышения частоты требует использования на цифровой голограммы этапе записи светочувствительной матрицы с меньшими геометрическими размерами пикселя при увеличении общего количества. Практически аналогичный результат можно получить, применив к файлу цифровой голограммы процедуру интерполяции: В качестве базовых выбираются все точки исходной цифровой голограммы, шаг

интерполяции принимается равным половине межпиксельного расстояния в матрице. При этом значения интенсивности оптического поля в средних точках рассчитываются методом ступенчатой интерполяции - в качестве промежуточного значения выбирается ближайшее известное значение рис. 1в представлен пространственный интерполированной цифровой голограммы (масштаб изменен в 2 раза по сравнению с рис. 1а). Наблюдается двукратное расширение спектрального окна по пространственным частотам, частотные компоненты объектного поля оказываются полностью включенными в пределы спектрального Пространственно-частотная компонентам окна. фильтрация объектного поля и обратное фурье-преобразование отфильтрованной области позволяют восстановить интерферограмму нагруженного объекта (рис. 1г). При этом наблюдается существенное увеличение контраста полос интерферограммы (в сравнении с рис. 1б).







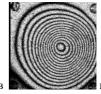


Рис. 1. Применение алгоритма обработки: спектр голограммы сфокусированного изображения, записанной с прямоугольным выходным зрачком объектива (а); интерферограмма упругого прогиба мембраны, жестко закрепленной по контуру, под действием центральной сосредоточенной силы (б); «расширенный» пространственный спектр голограммы (в); интерферограмма упругого прогиба мембраны, полученная в результате интерполяционной постобработки (г)

Показано, что программное увеличение частоты выборки цифровой голограммы, посредством ступенчатой интерполяции исходной голограммы, приводит к «расширению» окна пространственного спектра голограммы в области высоких частот. Это дает возможность выделить полный диапазон спектральных компонент, соответствующих объектному полю, записанному на голограмму, что позволяет добиться существенного повышения качества интерференционного изображения, восстанавливаемого с голограмм деформируемого объекта.

- 1. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. Т.49, №.7. С.762–770.
- 2. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. М.: Радиотехника, 2004.

И.А. ШЕВКУНОВ, Н.В. ПЕТРОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

ОСЕВАЯ ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ ФАЗОВЫХ ШАГОВ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНОЙ

Исследована упрощенная схема реализации метода фазовых шагов основанная на вращении плоскопараллельной пластины. Произведено качественное сравнение предложенного метода с методом внеосевой голографии, использующего смоделированную опорную волну.

I.A. SHEVKUNOV, N.V. PETROV

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics

DIGITAL IN-LINE PHASE SHIFTING HOLOGRAPHY WITH ROTATABLE PLANE-PARALLEL PLATE

A simplified phase shifting scheme of in-line holography is investigated. Qualitatively comparison of the proposed method with off-axis holography method based on the reference wave simulating was performed.

На данный момент, в цифровой голографии пользуются особой популярностью следующие методы восстановления информации об объектной волне: метод фазовых шагов, который определяет комплексную амплитуду поля, основываясь на регистрации нескольких голограмм, сдвинутых относительно друг друга на определенный фазовый шаг [1], и метод с использованием пространственной фильтрации в Фурье плоскости [2]. Также перспективным является метод восстановления внеосевых голограмм, основанный на концепцией пространственных фазовых шагов, где для вычисления фазы в каждом пикселе значения интенсивности берутся не из нескольких независимых интерферограмм, а из соседних пикселей вокруг искомого, расположенных на одной голограмме [3]. При этом, с практической точки зрения, реализация метода фазовых шагов затруднена необходимостью использования в экспериментальной схеме элемента, отвечающего за фазовый сдвиг опорной волны при регистрации нескольких голограмм. В работе нами исследовано альтернативное схемное решение для создания фазового

методе фазовых вращающейся сдвига шагов на основе плоскопараллельной пластины. Результаты сравнивались с методом [3], лучший результат который [4] показал при восстановлении амплитудного объекта. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. За её основу взят интерферометр Маха-Цендера, в опорном плече которого расположена моторизированная поворотная подвижка 9 с плоско-параллельной пластиной.

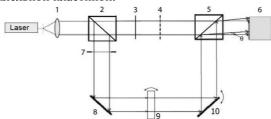


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 - коллиматор; 2,5 - светоделитель; 3 - светофильтр; 4 - исследуемый объект; 6 - КМОП матрица; 7 - диафрагма;

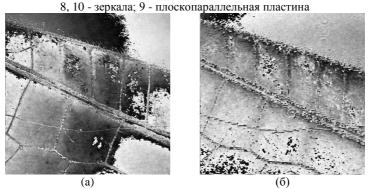


Рис.2. Восстановленная фаза объекта методом фазовых шагов (a) и методом внеосевой голографии (б)

Авторы благодарят за поддержку Министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

- 1. Mertz L. // Appl. Optics. 1983. V.22. P.1535.
- 2. Liebling M., Blu T., Unser M. // J. Opt. Soc. Am. 2004. V.21(3). P.367.
- 3. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. // J. Opt. Soc. Am. 1982. V.72(1). P.156.
- 4. Shevkunov I.A., Balbekin N.S., Petrov N.V. // Proc. SPIE. 2014. V.9271. P.927128.

Л.А. ПОРШНЕВА, В.В. КРАСНОВ, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ СЦЕН С РЕГИСТРИРУЕМЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Программно реализован метод восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля в среде МАТLAB и на языке C++. Проведены эксперименты по численному восстановлению голограмм размером от 64×64 до 4096×4096 пикселей. Получено динамическое воспроизведение объёмных сцен с регистрируемых голограмм размером 512×512 пикселей с частотой 21 Гц.

L.A. PORSHNEVA, V.V. KRASNOV, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

DYNAMIC RECONSTRUCTION OF VOLUME SCENES FROM REGISTERED DIGITAL HOLOGRAMS

The method of reconstruction of digital Fresnel holograms was realized in MATLAB and C++. Digital holograms with sizes varied from 64×64 to 4096×4096 pixels were numerically reconstructed. Dynamic reconstruction of volume scenes with 21 Hz frame rate was obtained using digital holograms with 512×512 pixels size.

В настоящее время в литературе описано значительное количество методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм [1-3]. Метод прямого расчёта дифракции Френеля (ПР) относится к числу наименее ресурсоёмких и лучших по качеству восстановления [3]. Данный метод был программно реализован в среде MATLAB и на языке программирования С++. Для экспериментов ПО численному восстановлению объёмных сцен использовались цифровые голограммы, регистрируемые научной измерительной MegaPlus II ES11000 [4]. Размер голограмм составлял от 64×64 до 2048×2048 пикселей. На рис. 1 показаны полученные зависимости восстановления сечений объёмной времени численного голограмм от числа пикселей голограмм. Голограмма с числом пикселей 4096×4096 была получена путём объединения 4 голограмм размером пикселей Вычисления производились на компьютере, 2048×2048 имеющем 3 ГБайт оперативной памяти и тактовую частоту 1,99 ГГц.

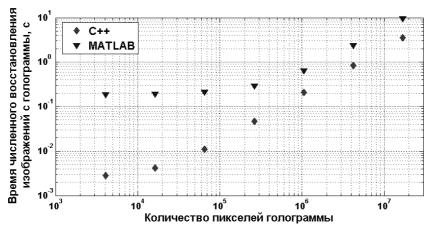


Рис. 1. Зависимость времени численного восстановления голограмм от их размера с помощью программных реализаций в среде MATLAB и на языке C++

Таким образом, как следует из полученных результатов, в случае динамического воспроизведения объёмных сцен с регистрируемых цифровых голограмм размером 1024×1024 пикселей можно получить кадровую частоту 5 Гц. В случае голограмм размером 512×512 пикселей скорость обновления кадров будет не более 21 Гц, что примерно соответствует стандартной кадровой частоте фильмов, равной 24 Гц. Использование более мощных компьютеров позволит восстанавливать сцены с регистрируемых голограмм с частотой фильмов.

- 1. Juptner W., Schnars U. Digital Holography. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- 2. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. Numerical and optical reconstruction of digital off-axis Fresnel holograms // Proceeding of SPIE. 2012. V.8429. P.84291M.
- 3. Verrier N., Atlan M. Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations // Applied Optics. 2011. V.50. No.34. P.H136–H146.
- 4. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Krasnov V.V., Rodin V.G. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types // Optical. Engineering. 2014. V.53. No.10. P.102107.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, С.Б. ОДИНОКОВ¹, Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСТРОЙСТВЕ КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗНАКОВ

Ранее было представлено устройство, разработанное для идентификации защитных голограмм по когерентным откликам элементов поверхности голограммы. Основные алгоритмы работы этого устройства основаны на применении методов корреляционного распознавания изображений. В данной работе дано описание особенностей применения этих методов.

E.Yu. ZLOKAZOV, S.B. ODINOKOV¹, R.S. STARIKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

¹Bauman Moscow state technical university

SPECIFICITY OF CORRELATION PATTERN RECOGNITION METHODS APPLICATION IN SECURITY HOLOGRAMS IDENTITY CONTROL DEVICE

Previously we represented the device that was developed to provide security hologram identification by processing of coherent responses of its surface elements. Most of the algorithms used in this device are based on application of correlation pattern recognition methods. In this paper specificities of these methods application are given.

Применение специальных голографических знаков (защитных голограмм) является одним из наиболее распространённых способов защиты ценных бумаг и документов как во всём мире, так и в Российской Федерации. В этой связи проверка подлинности защитных голограмм (ЗГ) является особо важной и необходимой задачей.

В [1-2] было представлено лазерное устройство локального контроля подлинности ЗГ. Принцип действия устройства основан на освещении элементов поверхности голограммы сфокусированным лазерным пучком, фиксации с помощью фотокамеры рассеянного светового поля и сопоставлении полученных спектральных изображений с изображениями, полученными при освещении соответствующих элементов поверхности эталонной ЗГ. Серьёзной проблемой, возникшей при отладке прибора,

оказалась большая погрешность попадания контрольного лазерного пучка в нужный элемент поверхности ЗГ. В качестве основных причин возникновения такой погрешности были выявлены следующие факторы: ошибки при ручном расположении контролируемой голограммы на ложементе прибора и геометрические искажения голограммы, возникшие при нанесении на поверхность документа. Кроме того, дизайн многих голограмм представляет собой периодически повторяющиеся изображения, нанесённые на лавсановую плёнку, покрывающую значительную область поверхности защищаемого документа без какойлибо привязки этих элементов к геометрии документа.

В связи с этим были предложены следующие методы решения перечисленных проблем: 1) осуществление привязки системы координат прибора к элементам исследуемых ЗГ в независимости от расположения документа на ложементе и 2) для каждой контролируемой зоны помимо изображения самой зоны при составлении эталона использовать также изображения соседних зон. В первом случае в приборе была оборудована система наведения, состоящая из светодиодной подсветки визуализации голографических изображений и цифровой видеокамеры для захвата голографических изображений с целью последующей постобработки. Постобработка заключалась в сшивке изображений для различных комбинаций светодиодов, очистке от шумов и поиска выбранных опорных элементов. Применение корреляционного изображений позволило осуществить распознавания привязку точностью, ограниченной лишь разрешением оптической системы канала наведения и разрешением использованной в нем камеры. В случае применения камеры с матрицей 480х640 пикселей точность привязки составила 0.1 мм. В случае когерентного контроля, были также использованы методы корреляционного распознавания изображений основанные на применении инвариантных к искажениям корреляционных фильтров. В соответствии с этими методами, эталон для каждой зоны рассчитывался на основе нескольких изображений когерентных откликов этой зоны, зафиксированных при различных смещениях канала контроля. Максимальная величина смещения была выбрана равной 1мм.

- 1. Kolyuchkin V.V., Zherdev A.Yu., Zlokazov E.Yu., Lushnikov D.S., Odinokov S.B., Smirnov A.V. Correlation method for quality control of master matrix used for embossing security holograms // Proc. SPIE. 2013. V.8776. P.87760A.
- 2. Цыганов И.К., Колючкин В.В., Пирютин Н.В., Одиноков С.Б., Талалаев В.Е., Злоказов Е.Ю. Оптико-электронный сканер для оперативного контроля подлинности защитных голограмм на паспортных документах // Сб.тр. конф. Голоэкспо-2014. С.151-158.

Д.Ю. МОЛОДЦОВ, В.Г. РОДИН, С.Н. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ DMD-МОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ В СХЕМЕ ДИСПЕРСИОННОГО КОРРЕЛЯТОРА

Рассмотрено использование бинарных голограмм Фурье для вывода на DMD-модулятор. Проведен вывод бинарных синтезированных голограмм-фильтров на DMD-модулятор. Экспериментальные результаты восстановления голограмм согласуются с результатами численного моделирования.

D.Yu. MOLODTSOV, V.G. RODIN, S.N. STARIKOV

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

POSSIBILITY OF USING DMD SLM FOR HOLOGRAM FILTERS DISPLAYING IN DISPERSIVE CORRELATOR

Binary Fourier holograms displaying by DMD SLM is discussed. Displaying synthesized binary Fourier holograms by DMD is performed. The experimental results on holograms reconstruction are in agreement with results of numerical simulations.

Цифровое микрозеркальное устройство DMD (Digital Micromirror Device) является основным элементом в технологии DLP, разработанной для использования в видеопроекторах. DMD представляет из себя матрицу микрозеркал (минимальный размер которых может достигать 5,4 мкм), расположенных на полупроводниковом чипе. Каждое зеркало соответствует пикселю выводимого изображения и может принимать одно из двух положений: «включено» и «выключено». Благодаря малому размеру пикселя матрицы и высокому быстродействию DMD-модуляторы представляют большой интерес для решения таких задач, как создание 3D-дисплеев, формирование световых пучков и др.

Достоинства DMD-модулятора делают его также привлекательным для использования оптических корреляторах. Однако первые экспериментальные результаты по отображению с помощью DMDкорреляционного модулятора фильтра В виде синтезированной голограммы Фурье опубликованы только в 2014 году. Невысокое качество полученного [1] восстановленного изображения, возможно, объясняется применением полутонового представления голограммы для вывода на DMD-модулятор. Представляется, что необходимо использовать бинарное представление голограмм из-за отсутствия возможности у DMD-модулятора «мгновенно» формировать пиксели с промежуточными значениями амплитуды световой волны. Эффект полутонов достигается усреднением за время кадра распределений интенсивности, формируемых последовательностью бинарных изображений.

В дисперсионном корреляторе [2] в качестве информативных признаков при распознавании объектов используются не только пространственные, но и спектральные характеристики объекта. Для формирования сигнала распознавания в таком корреляторе необходимо использовать амплитудные ПВМС, в которых нет фазовой модуляции света, а модуляция амплитуды не зависит от длины волны. DMD-модулятор полностью удовлетворяет этим требованиям. Ранее в экспериментах в качестве синтезированных голографических фильтров использовались напечатанные на прозрачной пленке амплитудные голограммы Фурье. В данной работе показана возможность применения DMD-модулятора в качестве устройства динамического вывода голографических фильтров в схеме дисперсионного коррелятора.

В экспериментах по пробному восстановлению синтезированных голограмм Фурье был использован бытовой DLP-проектор SIM2 RPA250. Из проектора были извлечены оптические системы формирования освещения и изображения, а также лампа и вращающийся цветовой диск. Поверхность модулятора освещалась коллимированным излучением лазера. Отраженная от DMD-модулятора волна проходила через фурьеобъектив и фиксировалась цифровой камерой. В соответствии с приведенными выше соображениями, на DMD-модулятор подавались только бинарные синтезированные голограммы Фурье с числом отсчетов до 512x512.

Результаты восстановления бинарных синтезированных голограмм Фурье согласуются с результатами численного моделирования, что говорит о возможности применения DMD-модулятора для вывода бинарных синтезированных голографических фильтров в дисперсионном корреляторе.

- 1. Chao T.-H., Lu T.T., Walker B., Reyes G. High-speed optical processing using digital micromirror device // Proc. SPIE. 2014. V.9094. P.909402.
- 2. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Дисперсионные корреляторы в системах оптической обработки информации // Инженерная физика. 1999. № 1. С.32-35.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-A-Будаговский И.А. 358 Абакирова Ж. 200 Будтолаев А.К. 302 Абдрахманова Г.И. 216 Будтолаева А.К. 302 Абрамова А.В. 220 Бурдукова О.А. 94 Авербух Б.Б. 344 Бурмак Л.И. 44 Адамов Г.Е. 68 Бусаров А.С. 149 Аккозов А.Д. 159, 185 Бусурин В.И. 118, 120 Алагашев Г.К. 78 Буфетов И.А. 18, 78 Александров С.Е. 112 Бухарин М.А. 82 Алиев С.А. 66 *Быков Н.В. 143* Ананын O Б 286 Быковский А Ю 167 Андреев Д.С. 302 Былина М.С. 32 Андреева О.В. 202 Бычковский Я.С. 322 Андрианова А.В. 216 Бышевский-Конопко О.А. 35 Антонова И.А. 292 Анцыгин В.Д. 58 Важинский О.Т. 238 Аракелян С.М. 134 Вайчас А.А. 312, 334 Арапов Ю.Д. 242 Вартапетов С.К. 82, 86, 276 Асалханова М.А. 232 Васильев И.В. 157 Асташкевич С.А. 342 Васильев Н.А. 141 Ахламов П.С. 118 Вахтомин Ю.Б. 26 -5-Ведяшкина А.В. 126 Бабанин В.Ф. 288, 290 Вейко В.П. 272, 278, 282 Баззал Х. 248, 258 Векшин М.М. 280 Балакший В.И. 40, 46 Вельмискин В.В. 80, 84 Балбекин Н.С. 352 Венедиктов В.Ю. 98 Безпалый А.Д. 220 Вениаминов А.В. 372 Безрук М.Н. 316 Вербицкий Е.В. 68 Белашов А.В. 196 Верозубова Г.А. 230 Бердюгин Н.А. 120 Верхотуров А.О. 220 Бетин А.Ю. 187 Вилейшикова Е.В. 250, 260 Бехтин Ю.С. 161 Виноградов А.В. 149 Билан Р.С. 72 Виноградова И.Л. 216, 218 Бирюков А.С. 18, 78 Висковатых А.В. 44 Бобринёв В.И. 187 Волков В.Г. 298. 300. 304. 306 Богданов Г.С. 286 Волова Л.Т. 310 Бойченко А.П. 262, 296 Волошин А.А. 141 Большаков А.П. 292 Волошинов В Б. 38 Бондарева А.П. 192 Воропай Е.С. 248, 258 Борискевич А.А. 183 Вытнов А.В. 30 **Борисов В.Н. 372 -Г-**Бородако К.А. 90 Гаврилов Г.А. 112 Бородкин А.А. 86 Гавричев В.Д. 96 Бубис E.Л. 358

Галаган Б.И. 80

Галуцкий В.В. 54 Ганжерли Н.М. 374 Ганин Д.В. 276 Герасимов И.А. 286 Гиндин П.Д. 298, 300, 304, 306 Гладуш М.Г. 134 Головашкин Д.Л. 348 Гольцман Г.Н. 26 Гончарова П.С. 108 Горюнов А.Е. 130 Горяев М.А. 266 Грахова Е.П. 216 Гребенников Е.П. 68 Гребенюк К.А. 179 Гречин С.Г. 242 Грибенюков А.И. 230 Губин М.Ю. 134 Гуляев С.Н. 374 Гурьева М.Н. 161

-Д-

Демьянович П.Д. 200 Денкер Б.И. 80 Деревянко Д.И. 88 Дёмичев И.А. 274 Джаманкызов Н.К. 204 Дианов Е.М. 80 Додухова И.А. 32 Довженко Д.С. 62 Донченко С.С. 187 Дражников Б.Н. 322 Дуденкова В.В. 128 Дудкина Т.Д. 270 Дураев В.П. 76 Дю В.Г. 56

-E-

Евтихиев Н.Н. 192, 194, 360 Егоров А.Н. 124 Егорова О.Н. 80, 84 Егорышева А.В. 270 Елезов М.С. 26 Еремеева А.А. 220 Ерин Д.Ю. 84 Ермаков А.А. 40 Ермолаев С.А. 316 Ероховец В.К. 183

-Ж-

Жердев А.Ю. 132 Жумалиев К.М. 159, 185, 200, 204 Жээнбеков А.А. 185, 200

-3.

Заалишвили Н.Ю. 175 Зажогин А.А. 260 Зажогин А.П. 248, 250, 258, 260 Закареева А.Р. 364 Заколдаев Р.А. 278 Захаров М.С. 314 Захаров С.М. 314 Захаров Ю.Н. 128 Зачиняев Ю.В. 214 Звайгэне М.А. 264 Звегинцев В.Н. 28 Зиновьев Е.В. 68 Злоказов Е.Ю. 187, 360, 384 Золотько А.С. 358

-И-

Иванов А.В. 288, 290 Иванов А.Ю. 324 Иванов Д.В. 30 Иванов П.А. 163 Иванова С.И. 28 Иванова С.В. 340 Ивахник В.В. 147 Игнатьев А.И. 268 Измоденова С.В. 254 Исмаилов Д.А. 185, 200

-K-

Казак А.А. 234 Казанцева Е.В. 138 Каленков Г.С. 189, 362 Каленков С.Г. 175, 189 Каминская Т.П. 171 Камшилин А.А. 110 Карачаров Г. 96 Каргин Ю.Ф. 56 Карлагина Ю.Ю. 282 Карпец Ю.М. 350 Касаткин Е.В. 76 Киреева Н.М. 108 Кислов Д.А. 252, 254 Кистенева М.Г. 56 Клюкин Д.А. 268 Князев Г.А. 38 Князьков А.В. 153 Ковалюк В.В. 26 Козлов Д.А. 145 Козлов К.В. 181, 322

Козловский К.И. 294 Колесников С.Ю. 116 Колчинский В.А. 330 Колючкин В.В. 206 Колядин А.Н. 78 Комоцкий В.А. 326 Комяк А.И. 250. 260 Кондюшин И.С. 322 Константинов М.В. 165 Коншина Е.А. 240 Коркишко Ю.Н. 222 Корнеенко Т.Н. 108 Короленко П.В. 151 Корольков В.П. 88, 284 Косова И.С. 141 Косолапов А.Ф. 78 Костина Г.В. 246 Кострицкий С.М. 222 Костюк Г.К. 278 Котликов Е.Н. 346 Котляр В.В. 145 Котова Е И 177 Кочиков И.В. 171 Краковский В.А. 60, 238 Краснов В.В. 192, 366, 370, 382 Кривенков В.А. 72, 294 Криштоп В.В. 108, 246 Крымцева К.О. 60 **Крюков Н.А. 332** Кудрявиев П.В. 202 Кузищин Ю.А. 294 Кузнецов П.А. 181 Кузьмин М.С. 356 Кузяков Б.А. 24, 208, 210 Кулакова Л.А. 38 Кульчин Ю.Н. 110 Купрейчик М.И. 46 Курбатова Е.А. 194, 370 Курочкин Ю.В. 26 Курочкина М.А. 240 Кутанов А.А. 105 Кутуза И.Б. 122 Кучеренко М.Г. 244, 254, 336

-П-

Лавров А.П. 28 Лапшин К.Э. 276 Лвин Н.Т. 120 Лексин А.Ю. 134 Леонтьева В.С. 268 Лесничий В.В. 376 Ливашвили А.И. 108, 246 Литвинов В.А. 228 Литвинова В.А. 228, 350 Литвинова М.Н. 350 Лиховодова Т.Б. 246 Ломанов А.Н. 157 Лявшук И.А. 324, 328 Ляликов А.М. 324, 328

-M

Маврицкий О.Б. 124 Майер Б.А. 288 *Маймистов А.И.* 138, 143 Макаревич А.В. 236 Макаров В.А. 136 Малов А.Н. 130, 312, 334 Малышев В.А. 141 Мамрашев А.А. 58 Манухин Б.Г. 202 Маныкин Э.А. 48 Мартынов И.Л. 62, 256, 264 Масальский Н.В. 114 Матузин Е.И. 272 Маурер И.А. 374 Мачихин А.С. 44 Медведев С.В. 76 Мелехов А.П. 270, 286 Мельникова Е.А. 234 Мельниченко Е.В. 48 Мерещенко А.С. 70 Мешков И К 216 *Миронников Н.Г. 88, 284 Миронов С.Н. 362* Митягин Ю.А. 294 Михалева Н.В. 288 Могильный В.В. 50 Молодцов Д.Ю. 386 Молчанов В.Я. 42 Мораренко В.В. 22, 24 Муравский Ал.Ан. 50 Муравский Ан.Ал. 50

-H-

Набиев И.Р. 72 Налбандян В.М. 244 Налегаев С.С. 64 Настулявичус А.А. 124 Нечипуренко Д.Ю. 171 Никитин В.А. 280 Николаев Н.А. 58 Николаева Т.Ю. 173 Никоноров Н.В. 268, 274 Нипполайнен Э. 103, 110 Новиков И.К. 286 Новикова Е.А. 312 Нурбек С.У. 105

-O-

Обидин А.З. 276 Образцова Е.Д. 270 Овеченко Д.С. 262 Одиноков С.Б. 132, 187, 206, 384 Одинцова Г.В. 282 Ожегов Р.В. 26 Окунев А.О. 230 Ольшин П.К. 70 Омельянюк Ю.Г. 288 Осипов Е.В. 62

-П-

Проклов В.В. 20, 35

Прохоров А.В. 134

Павлов А.В. 198 Павлов П.В. 130 Павлов С.В. 92 Палатников М.Н. 52, 226 Пантелей Е. 224 Паранин В.Д. 224 Паргачёв И.А. 60, 238 Пеганов С.А. 332 Петникова В.М. 136 Петров Н.В. 130, 173, 196, 352, 376, 380 Петрова Е.К. 360 Петухов В.А. 94 Печенкин А.А. 124 Пикуль О.Ю. 226 Пирог В.В. 286 Плёнкин А.П. 212 Подолян Н.П. 110 Пожар В.Э. 44, 122 Полесский А.В. 181 Пономарева Ю.В. 310 Пономарчук Ю.В. 108 Попов В В 171 Попов Н.Л. 149 Порошин Н.О. 68 Поршнева Л.А. 382 Потатуркин О.И. 58

Прохоров С.Д. 256 Прямиков А.Д. 78

-P-

Равин А.Р. 92 Расейкин Д.А. 54 Ринкевичюс Б.С. 126 Рогов С.А. 356 Родин В.Г. 382, 386 Ромашко Р.В. 110, 232, 316, 330 Руденко К.В. 136 Русинов А.П. 336 Русинов Г.Л. 68 Ручкина М.А. 132 Рыжикова Ю.В. 151 Рыжов И.В. 141 Рябухо В.П. 318, 378 Рябухо П.В. 318, 378 Рябуко П.В. 318, 378

-C-

Савельев М.В. 147 Савинов С.А. 294 Савонин С.А. 318, 378 Саенко И.И. 28 Самохвалов П.С. 72, 264 Сарыбаева А.А. 200 Сверчков С.Е. 80 Севостьянов О.Г. 222 Селезнева F А 308 Семенов М.А. 94 Семёнов С.Л. 74, 80, 84 Семенова И.В. 196 Семенова Л.Е. 338 Семкин А.О. 155, 354 Сенаторов А.К. 84 Сергеев М.М. 272, 278 Серебренников Л.Я. 60, 238 Сидоров А.И. 268, 274 Сидоров Н.В. 52, 226 Сидякина З.А. 368 Ситников Н.Н. 90 Скорнякова Н.М. 116 Скрипкин М.Ю. 70 Скуратова А.Л. 282 Смаев М.П. 358 Смирнов А.П. 266 Смирнов Н.А. 124 Смирнова А.Л. 177 Снимщиков И.А. 105

Сныткина Д.А. 282 _4_ Соловьев М.А. 98 Черёмхин П.А. 194, 364, 370, 376, 382 Соловьева Д.О. 72 Черноок С.Г. 84 Соляков В.Н. 181, 322 **Черных** Д.Ф. 374 Сотникова Г.Ю. 112 Чехановский Д.С. 326 *Чехлова Т.К.* 66, 92 Станкевич А.И. 50 Стариков Р.С. 165, 187, 360, 366, 370, 384 Чижиков С.И. 42 Стариков С.Н. 192, 194, 364, 366, 370, 386 Чинарева И.В. 302 Строганова Е.В. 54 Чиркова И.М. 222 Судариков К.В. 54 Чистяков А.А. 62, 72, 256, 264, 294 Султанов А.Х. 216 Чумаков А.И. 124 Суетин Н.В. 326 Чуманов М.В. 60 Сюй А.В. 108 -Ш--T-Шандаров В.М. 220 Тагильиева М.А. 60 Шандаров С.М. 56, 236, 238 Талыпов К.К. 159 Шапошников О.А. 318 Тарасенко К.С. 238 Шарангович С.Н. 155, 354 Тарновский А.Н. 70 Шаульский Д.В. 165, 169, 360 Таскина Л.А. 308, 310 Швецов С.А. 358 Тверьянович Ю.С. 70 Шевкунов И.А. 380 Тимофеев А.Н. 220 Шейфер Д.В. 90 Тимченко Е.В. 308, 310 Шелковников В.В. 88 Тимченко П.Е. 308, 310 Шеляков А.В. 90 Тихонов Р.В. 208, 210 Шепелевич В.В. 236 Ткаченко В.В. 183, 320 Шишканов О.Н. 296 Толстик А.Л. 234 Шмелев В.А. 24, 208 *Трегуб Н.В. 308* Шмелин П.С. 68 Трофимов Н.С. 66 Штанько А.Е. 189. 362 Трофимова А.В. 50 Шувалов В.В. 136 Туан Ф.А. 118 -Щ--V-Щербинин Д.П. 240 Умрейко Д.С. 250, 260 -Э-Умрейко С.Д. 250 Эрькин И.Ю. 366 -Ф--Ю-Федоров В.А. 222 Юрковец Е.В. 346 Федотов П.В. 270 Юров В.Ю. 292 Филатов А.Л. 35 Юшков К.Б. 42 Фролов В.В. 290 -Я--X-Яблокова Л.В. 348 Хакуашев П.Е. 302 Яковенко Н.А. 280 Хоркин В.С. 38 Яковлев Е.Б. 278 Хороших Д.А. 64 Яковлева Т.В. 153 Худяков Д.В. 82, 86 Якунина М.И. 246 Худякова Е.С. 56 Якушенков Ю.Г. 100 Яценко Ю.П. 80

Яцук Р.М. 282

Царук A.A. 30

Цыпкин А.Н. 64