

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ
ОПТИКЕ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,
2018. – 608 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 24-26 января 2018 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 22 ноября 2017 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2445-9

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2018

Подписано в печать 17.01.2018. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 38. Тираж 300 экз. Заказ №10.

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
- Евтихий Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Альтшулер Г.Б. – Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США
- Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
- Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Габитов И.Р. – Университет Аризоны, Тусон, США
- Десятников А.С. – Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия
- Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
- Козмоцкий 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 политехнический университет Петра Великого
- Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Малов А.Н. – Иркутский национальный исследовательский технический университет
- Маломед Б. – Тель-Авивский университет, Израиль
- Манькин Э.А. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
- Нипполайнен Э. – Университет Восточной Финляндии, Куопио, Финляндия
- Одинокоев С.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
- Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Проклов В.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва
- Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск
- Фетисов Ю.К. – Московский технологический университет (МИРЭА)
- Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

- Кузнецов А.П. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Ученый секретарь:
- Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

СОДЕРЖАНИЕ

МИНАЕВ В.П. О физических эффектах при воздействии лазерного излучения на биоткани..26	26
КОВАНИС В. Изменение парадигмы неэрмитовой фотоники, обусловленное созданием, оптической метамолекулы.....28	28
КУНДИКОВА Н.Д. Известные эффекты спин-орбитального взаимодействие света и предсказание новых эффектов.....30	30
АНДРЕЕВ А.Л., АНДРЕЕВА Т.Б., ЗАЛЯПИН Н.В., КОМПАНЕЦ И.Н. Переориентация жидкокристаллического сегнетоэлектрика в переменном электрическом поле.....32	32
СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ТЕПЛЯКОВА Н.А., МАНУКОВСКАЯ Д.В., СЮЙ А.В., КИЛЕ Е.О., ШТАРЕВ Д.С. Фотоэлектрические поля и ширина запрещенной зоны в кристаллах ниобата лития.....34	34
САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., МАНДЕЛЬ А.Е., АХМАТХАНОВ А.Р., ШУР В.Я. Дифракция света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития с приложенным синусоидальным полем.....36	36
СКРЯБИН Н.Н., БУХАРИН М.А., КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А., ХУДЯКОВ Д.В. Корректировка Y-разветвителей на протонообменных волноводах в ниобате лития с помощью технологии фемтосекундной записи.....38	38
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Пространственные периоды структур, формируемых ультракороткоимпульсным лазерным излучением в ниобате лития.....40	40
КОЛЕСНИКОВ А.И., ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ГРЕЧИШКИН Р.М., ВОРОНЦОВА Е.Ю., ИВАНОВА П.В. Исследования оптических аномалий в одноосных кристаллах методом лазерной коноскопии.....42	42
АЛОЯН Г.А., КОВАЛЕНКО Н.В., РЯБУШКИН О.А. Измерение малых коэффициентов оптического поглощения объемных кристаллов.....44	44
ЖЕВАЙКИН К.Е., ФОКИНА М.И., ДЕНИСЮК И.Ю. Исследование рефрактометрических параметров органических нелинейно-оптических кристаллов аминопиридинового ряда.....46	46
ЗЛОБИН А.О., ШАНДАРОВ С.М., БУРИМОВ Н.И., ШМИДТ А.А., ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., МАКАРЕВИЧ А.В. Попутное взаимодействие световых волн с циркулярной поляризацией в кристалле BSO среза (110)48	48

ТРЕТЬЯКОВ С.А., ИВАНОВА А.И., КАПЛУНОВ И.А., ЛАВРОВА Е.Ю. Метод тепловизионного контроля для оценки удельного сопротивления и концентрации легирующей примеси в монокристаллах германия.....	50
ЖУКОВА М.О., ГРАЧЁВ Я.В., ЧЕГНОВ В.П., ЧЕГНОВА О.И., БЕСПАЛОВ В.Г. Влияние примесей в кристаллах ZnSe на пропускание терагерцового излучения и динамику фотоэлектронов.....	52
МОЛЧАНОВА А.Д., БОЛДЫРЕВ К.Н., ПОПОВА М.Н., ПРОСНИКОВ М.А., ДУБРОВИН Р.М., ПИСАРЕВ Р.В. Динамика решётки бората меди $Cu_3(VO_3)_2$ со сложной слоистой кристаллической структурой.....	54
НЕКРАСОВ А.Д., ШАПИРО Б.И., КРИВОБОК В.С., ЛЕБЕДЕВ В.С. Люминесцирующие металлокомплексные J-агрегаты полиметиновых красителей для фотоники и оптоэлектроники.....	56
АРАКЕЛЯН С.М., КУЧЕРИК А.О., КУТРОВСКАЯ С.В., ОСИПОВ А.В., ХОРЬКОВ К.С., ИСТРАТОВ А.В. Лазерно-индуцированные топологические сверхпроводящие состояния тонких нанокластерных пленок – верификация в электрофизических и оптических характеристиках.....	58
ЗОЛОТОВ Ф.И., ДИВОЧИЙ А.В., ВАХТОМИН Ю.Б., ПЕНТИН И.В., МОРОЗОВ П.В., СЕЛЕЗНЕВ В.А., СМИРНОВ К.В. Применение тонких сверхпроводниковых пленок нитрида ванадия для изготовления счетчиков одиночных ИК фотонов.....	60
ВОЛГИНА Д.А., СТЕПАНИДЕНКО Е.А., КОРМИЛИНА Т.К., ЧЕРЕВКОВ С.А., ДУБОВИК А., БАРАНОВ М.А., ФЕДОРОВ А.В., УШАКОВА Е.В., БАРАНОВ А.В., ТАКАЙ К., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р. Исследование оптических свойств коллоидных комплексов аллоидная квантовая точка – наночастица золота.....	62
ЛЕВЧЕНКО К.С., ЧУДОВ К.А., ПОРОШИН Н.О., ЗИНОВЬЕВ Е.В., ЧИЧЕВА П.А., ШОХИНА Е.А., ШМЕЛИН П.С., ГРЕБЕННИКОВ Е.П. Органические хромофоры с нелинейно-оптическими свойствами для электрооптических модуляторов.....	64
ПОДКОПАЕВ А.В., МИСЬКЕВИЧ А.И. Экспериментальное исследование люминесценции эксимерной молекулы XeBr при возбуждении газовой смеси Ar-Xe- $C_2H_5BrClF_3$ частицами с высокой энергией.....	66
КИСЛОВ Д.А. Учет увеличения поглощательной способности молекул красителя при моделировании солнечных ячеек Гретцеля с металлическими наночастицами.....	68
ЯКУНЕНКОВ Р.Е., КНЯЗЕВ К.И., ФОКИНА М.И., ЗУЛИНА Н.А. Исследование оптических свойств органического красителя в полимерной матрице в присутствии плазмонного резонанса.....	70

БОЛДЫРЕВ К.Н., МОЛЧАНОВА А.Д., ПИСАРЕВ Р.В. Исследование фазовой В-Т диаграммы метабората меди CuB_2O_4 оптическим методом линейного антиферромагнитного дихроизма.....	72
АВДИЖИЯН А.Ю., ЛАВРОВ С.Д., ШЕСТАКОВА А.П. Оптические свойства твёрдых растворов дихалькогенидов переходных металлов.....	74
БОЧАРОВ А.А., РЫБИН М.Г., ФУРОВ А.Н., КОНДРАШОВ И.И., ОБРАЗЦОВА Е.Д., ЕРМАКОВ А.Д. Применение графенового фотодетектора и сцинтиллятора для детектирования гамма-излучения.....	76
ОРЕШКИНА К.В., ДУБРОВИН В.Д. Бромидные фототерморефрактивные стекла с пониженным содержанием фтора.....	78
ЕРИН Д.Ю., СЕМЁНОВ С.Л., ЕГОРОВА О.Н., ИСХАКОВА Л.Д., МИЛОВИЧ Ф.О., ЧЕРНООК С.Г. Активные световоды с сердцевиной из алюмофосфорсиликатного стекла с ионами иттеббия, полученного методом бесконтейнерного плавления.....	80
ЮШКОВ К.Б., НАУМЕНКО Н.Ф., МОЛЧАНОВ В.Я. Акустооптическая пространственная фильтрация изображений для визуализации фазовых объектов в микроскопии.....	83
ФИЛАТОВ А.Л. Подавление нулевого порядка акустооптической дифракции расходящегося лазерного излучения узкополосным акустическим сигналом.....	85
БОРИТКО С.В., ПОЖАР В.Э., КАРАНДИН А.В. Возможность непосредственной регистрации производных оптического спектра методами акустооптической спектроскопии.....	87
КОТОВ В.М., ШКЕРДИН Г.Н., АВЕРИН С.В. Формирование оптического луча с вращающимся вектором поляризации.....	89
ЛАВРОВ Е.А., МАЗУР М.М., ШИРЯЕВ В.С., СНОПАТИН Г.Е. Исследование затухания ультразвука в халькогенидном стекле As_2S_3	91
ПЕТРОВ Н.И. Эффект возобновления в оптических волноводах.....	93
МАЗИН М.А., ПАРАНИН В.Д. Исследование оптической разности хода градиентной линзы на основе астигматического преобразования бесселевых пучков.....	95
БЫЧКОВ С.Б., ВОЛКОВ И.В., ХАТЫРЕВ Н.П. Методика измерения параметров быстродействия высокоскоростных оптоэлектронных преобразователей.....	97
ДОРОЖКИН А.Н., НАНИЙ О.Е., ЛУКИНЫХ С.Н., ШИХАЛИЕВ И.И., СТАРЫХ Д.Д., КОНЬШЕВ В.А., ТРЕЩИКОВ В.Н. Распределенные рамановские усилители в волоконно-оптических линиях связи.....	100

БОГАЧКОВ И.В. Определение начального уровня бриллюэновского сдвига частоты в оптических волокнах различных видов.....	102
ЖИТЕЛЕВ А.Е., КОНЬШЕВ В.А., ЛЕОНОВ А.В., ЛУКИНЫХ С.Н., НАНИЙ О.Е., ТРЕЩИКОВ В.Н. Зависимость мощности нелинейного интерференционного шума ВОЛС от накопленной дисперсии.....	104
ЗЕМЦОВ Д.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., ОСИПОВ В.Г., СТАРИКОВ Р.С., ХАФИЗОВ И.Ж. Измерение нелинейных искажений третьего порядка радиофотонной линии X-диапазона.....	106
ВОХМИНЦЕВ К.В., ЛИНЬКОВ П.А., САМОХВАЛОВ П.С., ТАКАЙ К., ФЕДОРОВ А.В., БАРАНОВ А.В., НАБИЕВ И.Р. Крупномасштабный синтез квантовых точек PbS.....	108
ПОМОЗОВ А.Р., КОЛМЫЧЕК И.А., МУРЗИНА Т.В. Линейная и нелинейная оптическая спектроскопия массивов наностержней металла в диэлектрике.....	110
АЛИЕВ С.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ТРОФИМОВ Н.С., КОПЬЕВА М.А., ЧЕХЛОВА Т.К. Оптические свойства гель-пленок диоксида титана с добавлением наночастиц металлов.....	112
САВИН С.С., БЕСПАЛОВ А.В., НАЙДЕНОВ П.Н., ГЕРАСЬКИН А.А. Метод многократного ионно-лучевого осаждения-распыления для улучшения однородности оптически прозрачных и субмикронных нанопленок золота.....	114
ИВАНОВА А.К., ИОНИН А.А., КУДРЯШОВ С.И., САРАЕВА И.Н. Наносекундная лазерная генерация наночастиц кремния в воде.....	116
КОЗЛОВ А.А., АКСЕНОВ А.С., АБДУЛЛАЕВ С.Д., ИВАНОВ А.В. Изучение механизмов деградации сенсоров на основе фотонных кристаллов.....	118
ГАРТМАН А.Д., МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., СВЯХОВСКИЙ С.Е., МИТЕТЕЛО Н.В., КУДРИНСКИЙ А.А., МУРЗИНА Т.В. Спектроскопия двухфотонного поглощения в композитных плазмонных структурах на основе пористого кварца.....	120
НАЙДЕНОВ П.Н., ГОЛИКОВА О.Л., САВИН С.С., ЧЕХОВ А.Л., БЕСПАЛОВ А.В. Синтез симметричных 1D магнитоплазмонных кристаллов $\text{V}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ комбинированием ионно-лучевых методов.....	122
ШУГУРОВ А.И., БОДРОВ С.Б., МАШКОВИЧ Е.А., БАКУНОВ М.И. Неэллипсометрическое электрооптическое стробирование терагерцовых импульсов в GaAs.....	124

ГЛИНСКИЙ И.А., ПОНОМАРЕВ Д.С., ХАБИБУЛЛИН Р.А., ЯЧМЕНЕВ А.Э. Оценка эффективности преобразования фемтосекундных оптических импульсов в терагерцовое излучение в фотопроводящих антеннах на основе $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$	126
ХУСЯИНОВ Д.И. Динамика фотовозбужденных носителей заряда в пленках твердого раствора InGaAs при различных длинах волн накачки.....	128
МАМРАШЕВ А.А., МАКСИМОВ Л.В., НИКОЛАЕВ Н.А., ЧАПОВСКИЙ П.Л. Применение широкополосной терагерцовой спектроскопии для исследования орто- и параизомеров молекул воды.....	130
АЛЕКСАНДРОВ С.Е., ГАВРИЛОВ Г.А., КАПРАЛОВ А.А., МАТВЕЕВ Б.А., МУРАТИКОВ К.Л., СОТНИКОВА Г.Ю. Оптоэлектронные методы ИК-фотометрии в решении теплофизических задач.....	132
КОВАЛЕНКО Н.В., АЛОЯН Г.А., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А. Эквивалентная температура поверхности.....	134
ЛУКАШОВА Т.О., ТРЕЩИКОВ В.Н. Численное моделирование распределенного датчика измерения температуры на основе когерентного рефлектометра рассеяния Рэлея.....	136
НИКОЛАЕВ Н.Э., ПАВЛОВ С.В., ЧЕХЛОВА Т.К. Температурный коэффициент эффективного показателя преломления TE_1 и TM_1 мод оптических золь-гель волноводов.....	138
МАСАЛЬСКИЙ Н.В. Оптические волноводы с гауссовым профилем легирования на основе структуры кремний на изоляторе.....	140
ТЕБЕНЕВА Т.С., БЕНДЕРОВ О.В., СТЕПАНОВ Б.С., ИГНАТОВ А.И. Методика изготовления и характеристика халькогенидных волоконно-оптических разветвителей.....	142
АЛЕКСЕЕВ А.С., НОВИКОВ С.Г., БЕРИНЦЕВ А.В., РОДИОНОВ В.А., СВЕТУХИН В.В. Экспериментальные исследования волоконного сенсорного элемента для дозиметрии радиационных гамма-источников.....	144
МИНАЕВ Н.В., ЖИГАРЬКОВ В.С., ЧУРБАНОВА Е.С., ЮСУПОВ В.И., БАГРАТАШВИЛИ В.Н. Лазерная печать гелевыми микрокаплями с живыми клеточными и микробными объектами.....	146
КОЛЫМАГИН Д.А., ЗВАГЕЛЬСКИЙ Р.Д., ЧУБИЧ Д.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г. Периодические структуры, созданные методом STED-DLW стереолитографии: морфология и оптические свойства.....	148
КРУЖАЛОВ С.В., ЛАВРОВ А.П., ЛЕОНОВ М.Б., МАТЮШИН И.В., ПАРПИН М.А., СЕРЕГИН Д.А., ВАСИЛЬЕВ Н.Д. Моделирование и экспериментальное исследование фокусирующих свойств двумерной зонной пластинки Френеля при синтезе ее колец набором малых отверстий.....	150

КАРЕВ П.В.	
Пьезоактуаторы для микроперемещений в оптоэлектронике.....	152
БАРЫШЕВ С.А., ОДИНОКОВ С.Б., КУЗНЕЦОВ А.С.	
Плазмонные магнитооптические структуры для визуализации магнитных носителей информации.....	154
ГОРБАЧ Д.В., НАЗАРОВ С.А., МЕЛЬНИКОВА Е.А., КУРИЛКИНА С.Н., ТОЛСТИК А.Л.	
Спин-орбитальное преобразование бесселевых световых пучков жидкокристаллическими элементами.....	156
КУТАНОВ А.А., СЫДЫК УУЛУ Н., ВЕЛИКАСОВ С.С.	
Трёхмерная лазерная запись на слое аморфного кремния.....	158
КАЛЕНКОВ С.Г., КАЛЕНКОВ Г.С., ШТАНЬКО А.Е.	
Гиперспектральная голография микрообъектов в некогерентном свете.....	160
ПУТИЛИН А.Н., МОРОЗОВ А.В., ДРУЖИН В.В., ЖИРКОВ А.О.	
Голографические НМД-дисплеи.....	162
КРАСНИКОВ И.В., СЕТЕЙКИН А.Ю., РОТ Б., МЕЙНХАРДТ-ВОЛВЕБЕР М.	
Моделирование методом Монте-Карло рамановского рассеяния с фиксированной длиной волны при конфокальной микроскопии в биотканях.....	164
ЛЬВОВ К.В., СТРЕМОУХОВ С.Ю., ПОТЕМКИН Ф.В.	
Влияние рамановской нелинейности на генерацию суперконтинуума при филаментации в конденсированных средах.....	166
МАЙМИСТОВ А.И., ДОВГИЙ А.А.	
Распределение полей в бинарном массиве линейных волноводов.....	168
НАСОНОВ А.А., НОВИКОВ В.Б., МУРЗИНА Т.В.	
Усиление генерации второй оптической гармоники плазмонными наночастицами в фотонно-кристаллическом микрорезонаторе.....	170
ГУБИН М.Ю., КАРПОВ С.Н., ПРОХОРОВ А.В.	
Формирование неклассических состояний локализованных плазмонов в спазерных системах под управлением внешнего магнитного поля.....	172
ПЕРЕСКОКОВ В.С., ДЗЕДОЛИК И.В.	
Формирование вихрей поверхностных плазмон-поляритонов при отражении от криволинейной границы.....	174
БИКБАЕВ Р.Г., МЫСЛИВЕЦ С.А., СВЯХОВСКИЙ С.Е., ЕВЛАШИН С.А., ВЬЮНЬШЕВ А.М., ПАНКИН П.С., ТИМОФЕЕВ И.В., ВЕТРОВ С.Я., АРХИПКИН В.Г.	
Широкополосный таммовский плазмон-поляритон.....	176
КАЗАНЦЕВА Е.В.	
Распространение поляритонов в неидеальной брэгговской решётке.....	178
БЫЛИНА М.С., ГЛАГОЛЕВ С.Ф.	
Моделирование электромагнитного поля основной моды в одномодовом волокне с осесимметричным профилем показателя преломления.....	180

СЫЧУГИН С.А., БАКУНОВ М.И. Модель генерации квазистатического предвестника лазерным импульсом конечного поперечного размера.....	182
ВЕРГЕЛЕС С.С., ОГОРОДНИКОВ Л.Л., ЛЕБЕДЕВ В.В., КОЛОКОЛОВ И.В. Статистика интенсивности в случайном волоконном лазере.....	184
КУЛЯ М.С., СЕМЕНОВА В.А., БЕСПАЛОВ В.Г., ПЕТРОВ Н.В. Пространственно-временная эволюция импульсного широкополосного терагерцового гаусс-бесселева пучка.....	186
АСТАПОВИЧ М.С., КОЛЯДИН А.Н., ГЛАДЫШЕВ А.В., КОСОЛАПОВ А.Ф., ПРЯМИКОВ А.Д., ХУДЯКОВ М.М., ЛИХАЧЕВ М.Е., БУФЕТОВ И.А. Получение эффективной ВКР-генерации на 4,4 мкм и измерение с её помощью оптических характеристик полого револьверного световода.....	188
БУРДУКОВА О.А., ПЕТУХОВ В.А., СЕМЕНОВ М.А. Квазипродольная накачка лазера на красителях зелеными лазерными диодами.....	190
ЯКУШЕНКОВ П.О. Модуляция излучения полупроводникового лазера изменением намагнитичности среды.....	192
КУДЕЛИН И.С., ДВОРЕЦКИЙ Д.А., САЗОНКИН С.Г., ОРЕХОВ И.О., ПНЕВ А.Б., КАРАСИК В.Е., ДЕНИСОВ Л.К. Особенности генерации групп связанных солитонов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором.....	194
ЯКУНИН В.П. Характеризация активных сред диодных и волоконных лазерных систем для задач масштабирования мощности мультикиловаттного уровня излучения на базе некогерентных методов суммирования пучков.....	196
ШИЛОВА Г.В., СИРОТКИН А.А., ЗВЕРЕВ П.Г. Nd:YAP лазер с внутрирезонаторным ВКР преобразованием и генерацией суммарной частоты.....	198
ШУЛЬГА А.В., ХОМЧЕНКО А.В., ШИЛОВА И.В. Волноводный метод дискриминации мод лазера.....	200
ЕГОРОВ Ф.А., ПОТАПОВ В.Т. Поляризационная модуляция света в анизотропных микро-(нано) световодах с крутильными колебаниями.....	202
ДМИТРИЕВ А.Л., ЧЕСНОКОВ Н.Н. Уменьшение веса волоконного световода при распространении в нем лазерного излучения.....	204
ФЕДОРЦОВ А.Б., МАНУХОВ В.В., ИВАНОВ А.С. Двухлазерный бесконтактный метод определения электронных свойств полупроводников и диэлектриков.....	206
УС Н.А., ЗАДОРОЖНИЙ С.П., АВЕРШИН А.А. Кольцевой лазерный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом.....	208

АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Лазерная десорбция следов взрывчатых веществ в спектрометрии ионной подвижности.....	210
ВИНАРОВ А.З., ДЫМОВ А.М., СОРОКИН Н.И., МИНАЕВ В.П., ЛЕКАРЕВ В.Ю.	
О различии в воздействии на мягкие ткани в газовой и водной среде излучения с длиной волны около 2 мкм.....	212
ОРЛОВ А.В., БАЙКОВА Т.В., БАХМУТОВ Д.Н., ГОНЧУКОВ С.А., СВИСТУНОВА Т.С.	
Спектроскопия комбинационного рассеяния света и флуоресцентная спектроскопия биологических жидкостей.....	214
ЕФИМОВ Т.А., ЗАХАРЕНКО А.М., КУЛЬЧИН Ю.Н., РОМАШКО Р.В.	
Лазерный биосенсор на основе микромеханических осцилляторов.....	216
ЗАЙЦЕВ В.В., МАМОНТОВ О.В., КАМШИЛИН А.А.	
Измерение показателей периферического кровотока в конечностях с помощью фотоплетизмографии.....	218
ВАСИЛЕНКО А.Н., ПРИМАК И.У., ХОМЧЕНКО А.В.	
Измерение профиля двулучепреломления на основе анализа рассеянного излучения.....	220
ЗАБАЛУЕВА З.А., НЕПОМНЯЦАЯ Э.К., ВЕЛИЧКО Е.Н., АКСЁНОВ Е.Т.	
Развитие лазерной корреляционной спектроскопии при помощи метода взаимных корреляций.....	222
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., МУЛИН П.В., ВИН Й.Н.	
Анализ влияния линейного ускорения на характеристики кольцевого оптоэлектронного трехосевого преобразователя угловых скоростей.....	224
ЦАРЕВА А.М., МАКАЕВА Р.Х., САФИНА Д.М.	
Применение оптических методов контроля в авиастроении.....	226
СУЕТИН Н.В.	
Экспериментальные характеристики модулятора лазерного излучения с модулирующим блоком, содержащим две фазовые дифракционные решетки.....	228
КУДРЯВЦЕВ П.С., ЛЮ Ч.	
Исследование системы прогноза при измерении высоты с помощью бесконтактного сканирующего профилометра.....	230
ПАВЛОВ И.Н., РАСКОВСКАЯ И.Л., РИНКЕВИЧЮС Б.С.	
Измерение скорости испарения капли жидкости с прозрачной подложки с помощью рефракционного метода.....	232
АРТЮКОВ И.А., БУСАРОВ А.С., ВИНОГРАДОВ А.В., ПОПОВ Н.Л.	
Когерентная рентгеновская отражательная микроскопия при освещении объекта под скользящими углами.....	234
БЫКОВСКИЙ А.Ю., ЩЕРБАКОВ А.А.	
Позиционно-зависимая криптография в смешанной схеме многозначной логики и квантового распределения ключа.....	236

ПЛЁНКИН А.П., ОГОРОДНИКОВ Ю.Ю. Об аппроксимации задачи цельной факторизации для квантовой криптографии.....	238
ПАВЛОВ А.В. Влияние ограниченности свойств регистрирующих сред на эффективность выявления общих фрагментов методом наложенных голограмм Фурье.....	240
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КУРБАТОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А. Квантование коэффициентов при вейвлет-сжатии внеосевых цифровых голограмм.....	242
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В. Метод асимметричного оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением.....	244
ИВАНОВ П.А. Квадратичные фильтры в задачах распознавания изображений с использованием оптико-электронных корреляторов.....	246
ВОЛОСТНИКОВ В.Г., ВОРОНЦОВ Е.Н., КОТОВА С.П., ЛОСЕВСКИЙ Н.Н., ПРОКОПОВА Д.В., САМАГИН С.А. Разработка фазовых фильтров для 3D локализации точечных излучателей.....	248
СОКОЛЕНКО Б.В., ХАЛИЛОВ С.И., ПРИСЯЖНЮК А.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А. Вихревая интерференционная микроскопия на основе пучков Лагерра-Гаусса.....	250
КОВАЛЕВ М.С., КРАСИН Г.К., ОДИНОКОВ С.Б., СОЛОМАШЕНКО А.Б. Расчет дифракционного интеграла с применением полиномов Чебышева.....	252
АРСЕНЬЯН Т.И., БЛАНК А.В., ВОХНИК О.М., КОНОНЕНКО В.С., СУХАРЕВА Н.А., ТУГАЕНКО В.Ю. Неравновесная термодинамика ансамбля когерентных волновых пучков.....	254
КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т., РЫЖИКОВА Ю.В. Фотоника: эстетический аспект.....	256
КУЗНЕЦОВ П.А., МОЩЕВ И.С., КУЗНЕЦОВ А.Н. Расширение динамического диапазона коротковолновых ИК ФПУ автоподстройкой времени накопления.....	258
ВЛАДИМИРОВ А.П., МИХАЙЛОВА Ю.А., ДРУКАРЕНКО Н.А. Динамическая спекл-интерферометрия технических и биологических объектов.....	260
ПАВЛОВ П.В., МАЛОВ А.Н., НЕУПОКОЕВА А.В. Определение технического состояния рабочих жидкостей по анализу параметров цифровых спекл-изображений.....	262
ИСМАНОВ Ю.Х., ТЫНЬШОВА Т.Д., ИСМАЙЛОВ Д.А., КУЛМУРЗАЕВ Н.М. Многоканальный голографический интерферометр для исследования сложных фазовых и отражающих сред.....	264

ОСИНЦЕВ А.В. Исследование размерной стабильности металлокерамических протезов методом голографической интерферометрии.....	266
ЧЕРНЫХ Д.А., ЧЕРНЫХ В.Т. Голографический метод для изучения нестационарных процессов.....	268
МИРОНОВА Т.В., КРАЙСКИЙ А.В. Определение коэффициента диффузии в гидрогеле.....	270
КЛЫЧКОВА Д.М. Пространственный спектр сигнала когерентности при дефокусировке объекта в цифровой голографической микроскопии на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно-когерентным освещением.....	272
ДУДЕНКОВА В.В., ЗАХАРОВ Ю.Н. Исследование флуоресцентных биологических объектов методом локализационной флуоресцентной микроскопии BaLM в лазерном сканирующем режиме.....	274
ЧИПЕГИН А.А., ПЕТРОВ Н.В. Особенности управления волновым фронтом с использованием матрицы микрозеркал в цифровой интерферометрической диагностике.....	276
КОВАЛЕВ М.С., ОДИНОКОВ С.Б., РУЧКА П.А. Цифровой синтез голограмм Фурье с учетом методов их реализации.....	278
КОВАЛЕВ М.С., ОДИНОКОВ С.Б., СЦЕПУРО Н.Г. Голограммы Френеля: методы синтеза и применения.....	280
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х., ЖУМАЛИЕВ К.М., АЛЫМКУЛОВ С.А. Распределение температурных полей в фототермопластической среде при записи голограмм.....	282
ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В., КОСТИНА Г.В., ВИНОГРАДОВА П.В., КИРЕЕВА Н.М. Динамика волн переключения в наножидкости, находящейся в световом поле.....	284
СИДОРОВ Н.В., ГОРЕЛИК В.С. Прерывистая траектория сфокусированного лазерного излучения и лазерное возбуждение связанных состояний двух фотонов в диэлектрических кристаллах.....	286
МИНЬКОВ К.Н., РУЖИЦКАЯ Д.Д., САМОЙЛЕНКО А.А. Расчёт параметров спонтанного параметрического рассеяния для выбора характеристик нелинейного кристалла.....	288
ЛИТВИНОВА М.Н., ПОГОДИНА В.А., СЮЙ А.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Электрооптические свойства легированных кристаллов LiNbO_3	290
БРЕЦЬКО М.В., ЛАПАЕВА С.Н. Взаимодействие коноскопической картины с сингулярностями в электрооптическом кристалле.....	292

БОБРЕВА Л.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Водородные связи в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$	294
ПИКУЛЬ О.Ю. Использование компенсатора в лазерной коноскопии для определения оптических параметров кристалла.....	296
ДЮ В.Г., СОКОЛОВ Д.В., ТОКМАШЕВ Т.Д., ШАНДАРОВ С.М. Динамика оптического поглощения в кристалле $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, индуцированного наносекундными лазерными импульсами.....	298
МАКСИМЕНКО В.А. Исследование фотоиндуцированных дефектов в фоторефрактивных кристаллах поляризационно-интерференционным методом.....	300
КОЛЕСНИКОВ А.И., КАПЛУНОВ И.А., ТРЕТЬЯКОВ С.А., ГРЕЧИШКИН Р.М., ЛЯХОВА М.Б., РЫБИНА С.С., ВОРОНЦОВ М.С. Закономерно ориентированные блики при отражении лазерного света от полированных поверхностей монокристаллов.....	302
СИМ Е.С., ШАНДАРОВ С.М., КИСТЕНЕВА М.Г., ЖУРИН Т.А., СМИРНОВ С.В. λ -Модуляция фотопроводимости в кристалле германата висмута.....	304
ПРУДНИКОВ И.Р. Особенности дифракции световой волны в 1-D фотонном кристалле с несколькими ультратонкими разделительными слоями.....	306
ПУСТОЗЕРОВ А.В., ОКУНЕВ Д.В., ШАНДАРОВ В.М. Исследование условий самофокусировки световых пучков в ниобате лития с фотовольтаическим механизмом нелинейного отклика при воздействии фоновой подсветки.....	308
ГАЛУЦКИЙ В.В., ГУРСКАЯ Е.М., ЯКОВЕНКО Н.А. Моделирование градиентного PPLN:Yb ³⁺ усилителя оптических сигналов...310	
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., МОЖАЕВА В.А., БАДИКОВ Д.В., БАДИКОВ В.В. Моделирование широкополосного преобразования частоты излучения СО лазера в нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$	312
МАРЦЕВА А.В., АБДИРАЛИ Е.Е., ШАНДАРОВ С.М., СИМ Е.С., СМИРНОВ С.В., СЕРЕБРЕННИКОВ Л.Я., КОЛЕГОВ А.А. Спектральные зависимости оптического пропускания эпитаксиальных структур GaN/InGaN, выращенных на сапфировой подложке.....	314
ВЕКШИН М.М., КУПЛЕВИЧ М.А., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Создание интегрально-оптических разветвителей 1×4 в стекле ионным обменом из расплава соли KNO_3	316
КНЯЗЬКОВ А.В., СМУРОВ С.А. Исследование поверхностного распределения электрооптических свойств среды в поперечной ячейке с помощью отраженного света.....	318
КАРАНСКИЙ В.В., СМИРНОВ С.В. Планирование поверхности оптических модуляторов из Mn-Zn ферритов с помощью электронно-лучевой обработки.....	320

ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Разработка модового мультиплексора на основе интегрально-оптического асимметричного Y-разветвителя в стекле.....	322
НИКИТИН П.А. Обратная коллинеарная дифракция широкополосного излучения.....	324
ПРОКЛОВ В.В., РЕЗВОВ Ю.Г. Дифракция плоской световой волны в многочастотном акустооптическом фильтре.....	326
ПЕТРОВ Н.И., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В., УСИЕВИЧ Б.А. Резонансное поглощение света субволновыми дифракционными решетками.....	328
БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО О.А., ПРОКЛОВ В.В., ВЕЛИКОВСКИЙ Д.Ю., КАРАНДИН А.В. Исследование метода дистанционного распознавания оптических сигналов по их априорно известным спектральным признакам на базе использования многополосной акустооптической фильтрации излучения.....	330
ЯКОВЛЕВА Т.В. Нелинейная фильтрация райсовских данных как основа нового подхода к измерению фазового сдвига сигналов.....	332
АКИМОВА Я.Е., ЕГОРОВ Ю.А. Измерение орбитального углового момента пучков с дробным топологическим зарядом.....	334
АГЕЕВ А.Е., ДЖИОЕВ С.Э., ИВАНОВ Д.А., КУЗЯКОВ Б.А. Комбинированная оптическая система связи с применением орбитальных угловых моментов фотонов.....	336
ЧАЙМАРДАНОВ П.А. Разработка программного обеспечения для компьютерного моделирования волоконно-оптических систем передачи.....	338
ЛУТЧЕНКО С.С., БОГАЧКОВ И.В., КОПЫТОВ Е.Ю. Определение коэффициента готовности ВОЛС с учетом влияния внешних факторов.....	340
БАРШАК Е.В., ВИКУЛИН Д.В., ЯВОРСКИЙ М.А. ГЕЙТ SNOT в мульти эллиптических оптических волокнах.....	342
БОГАЧКОВ И.В. Изучение особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в специализированных оптических волокнах.....	344
ЗАИЧКО К.В. Моделирование затухания оптического волокна при различных дозах ионизирующего излучения.....	346
УКОЛОВ Д.С., ЧЕРНЯК М.Е., МОЖАЕВ Р.К. Исследование затухания оптического сигнала в одномодовом радиационно стойком фторосодержащем оптоволокне при воздействии гамма-излучения.....	348

КУЗЯКОВ Б.А. Метод ретрансляции сигналов оптического диапазона в атмосферной линии связи с использованием квадрокоптера.....	350
ГАМИЛОВСКАЯ А.В., ВОЛЬХИН Ю.Н., АНДРЕЕВ А.С., БОГАЧКОВ И.В. Сверхширокополосный преобразователь частоты, реализуемый с использованием методов и средств радиофотоники.....	352
ВОЛКОВ И.В. Оптическая подстраиваемая лучеформирующая система для расширения полосы приема радиотелескопа СВЧ-диапазона с 2D-фазированной антенной решеткой.....	354
ГОНЧАРОВ С.А., КРИВЕНКОВ В.А., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р., РАКОВИЧ Ю.П. Люминесцентные свойства тонкопленочного наногибридного материала из квантовых точек и золотых наностержней.....	356
КОБРАНОВА А.А., СИДОРОВ А.И., ЛЕБЕДЕВ В.Ф., АНТРОПОВА Т.В. Формирование нанодIAMAZOV из углеродных квантовых точек в нанопористом стекле при лазерном облучении.....	358
КОЛЧИН А.В., КАШАЕВ Ф.В., СКОБЁЛКИНА А.В., ЗАБОТНОВ С.В., ГОЛОВАНЬ Л.А., ПРЕСНОВ Д.Е., КАМИНСКАЯ Т.П., КАШКАРОВ П.К. Особенности рассеяния света и фотолюминесценции в кремниевых наночастицах, формируемых методами химического травления и лазерной абляции в жидкостях.....	360
КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А. Теоретические спектры диэлектрической проницаемости изоэлектронного ряда кристаллов Ge-GaAs-ZnSe-CuBr.....	362
ОРЕШКИНА К.В., ДУБРОВИН В.Д., ПИЧУГИН И.С. Люминесцентные свойства и кинетика кристаллизации натриевоалюмосиликатных стекол, содержащих нанокристаллы SrF ₂ и BaF ₂ и европий.....	364
ЛОЗИНГ Н.А., ГЛАДУШ М.Г., ЕКИМОВ Е.А., ЕРЕМЧЕВ И.Ю. Спонтанные переключения интенсивности флуоресценции микрорекристалла алмаза с германиевыми центрами.....	366
АНТОНОВ Е.А., КАЛУГИН А.И. Характеристические потери электронов и диэлектрическая проницаемость алмаза.....	368
ПЯТНОВ М.В., АВДЕЕВА А.Ю., ВЕТРОВ С.Я. Гибридные состояния оптических локализованных мод в хиральной фотоннокристаллической структуре.....	370
КРЮКОВА И.С., ДОВЖЕНКО Д.С., ЧИСТЯКОВ А.А., НАБИЕВ И.Р. Изготовление свободных фотонных кристаллов на базе пористого кремния.....	372
ПАНКИН П.С., СВЯХОВСКИЙ С.Е., ВЬЮНЫШЕВ А.М., ТИМОФЕЕВ И.В., ВЕТРОВ С.Я. Дефектные моды в квазипериодическом фотонном кристалле.....	374

ВИЛЕЙШИКОВА Е.В., РАЧКОВСКАЯ Г.Е., КИЧАНОВ С.Е., ЗАХАРЕВИЧ Г.Б. Структура и кооперативная ап-конверсия оксифторидной стеклокерамики с нанокристаллами $\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}:\text{PbF}_2$	376
СТОЛЯРЧУК М.В., ЧЕРНАКОВ Д.И., СИДОРОВ А.И. Запись люминесцентных оптических волноводов в ФТР стекле УФ-излучением.....	378
ДАВИДОВ В.Н., ТУЕВ В.И., КАРАНКЕВИЧ О.А. Применение принципа Онзагера к полярно-аксиальным явлениям в кристаллооптике.....	380
КУЧЕРЕНКО М.Г., РУСИНОВ А.П., КИСЛОВ Д.А. Расчет характеристик поля в периодических решетках, составленных из металлических наностержней с активированными плазмонными модами.....	382
ЗАКОМИРНЫЙ В.И., ГЕРАСИМОВ В.С., ЕРШОВ А.Е. Нитрид титана как альтернативный плазмонный материал для периодических структур с узким резонансом.....	384
ПОПОВ М.Е., ЖДАНОВА К.Д., МИТЕТЕЛО Н.В., МАМОНОВ Е.А., МУРЗИНА Т.В. Нелинейные эффекты третьего порядка в органических микроструктурах....	386
КУЧЕРЕНКО М.Г., ТЕРЕНИНА Л.В. Эффективная поляризуемость сферического слоистого нанокомпозита в 2D и 3D решетках из идентичных элементов.....	388
ДОЛГИХ И.А., КОЛМЫЧЕК И.А. Генерация оптической второй гармоники в массивах пермаллоевых С-образных наноструктур.....	390
КУЧЕРЕНКО М.Г., ЧМЕРЕВА Т.М. Магнитный круговой дихроизм оптического поглощения биметаллических слоистых наночастиц с ферромагнитным кором и диамагнитной оболочкой.....	392
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М. Пороговые характеристики инфракрасных МДП-детекторов на основе варизонного HgCdTe , выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на альтернативных подложках.....	394
АВЕРИН С.В., КУЗНЕЦОВ П.И., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М. Электрические, оптические и спектральные характеристики $\text{ZnSe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ гетероструктуры и МПМ-фотодетектора на ее основе.....	396
ДАВИДОВ В.Н., СОЛДАТКИН В.С., КАРАНКЕВИЧ О.А. Резистивное профилирование как метод исследования полупроводниковых приборов и гетероструктур.....	398
МОШКОВА М.А., ДИВОЧИЙ А.В., МОРОЗОВ П.В., ЗОЛОТОВ Ф.И., ВАХТОМИН Ю.Б., СМИРНОВ К.В. Высокоэффективные NBN однофотонные детекторы с разрешением числа фотонов.....	400

ДАВЫДОВ В.Н., КАРАНКЕВИЧ О.А. Захват и эмиссия носителей заряда квантовой ямой полупроводникового источника оптического излучения.....	402
БАБКИН О.Э., МЕЛИДИНА А.А., ИЛЬИНА В.В., БАБКИНА Л.А. Очистительный фотополимерный материал для производства оптических кабелей.....	404
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И. Полимерные слои для оптических структур с управляемыми волноводными параметрами.....	406
СИМОНОВ Н.О., ФЛОРЯ И.Н., КОРНЕЕВА Ю.П., КОРНЕЕВ А.А., ГОЛЬЦМАН Г.Н. Однофотонный отклик в тонких сверхпроводящих MoN_x пленках.....	408
ЧИСТОЕДОВА А.А. Оптические свойства пленок ИТО.....	410
СМИРНОВ В.В., АЛЫКОВА О.М., БЕЗНИСКО Е.И. Расчет основных параметров пленок феррит-гранатов с учетом эмпирических коэффициентов.....	412
АНДРЕЕВА Я.М., АГЕЕВ Э.И., СЕРГЕЕВ М.М., ВЕЙКО В.П. Лазерный синтез наночастиц меди в пористых пленках на основе силикатных золь-гелей.....	414
ДАНИЛОВ П.А., ИОНИН А.А., КУДРЯШОВ С.И., САРАЕВА И.Н., УМАНСКАЯ С.Ф. Фемтосекундное лазерное воздействие на тонкую пленку оксида меди (I)....	416
ГОРБЯК В.В., СИДОРОВ А.И., ПОДСВИРОВ О.А., ЮРИНА У.В. Электронно-лучевая запись оптической информации в серебросодержащих стеклах.....	418
ГОРЯЕВ М.А. Условия сенсбилизации фотоэффекта в системе краситель – полупроводник.....	420
ВОЛКОВА Н.А., ИСТОМИНА О.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., КОЛОБКОВА Е.В., НИКОНОВ Н.В. Особенности фотолиза диазокрасителя Chicago Sky Blue в водных растворах нитратов металлов и органо-неорганических покрытиях.....	422
ЕГОРЫШЕВА А.В., ДУДКИНА Т.Д., ГАЙТКО О.М., ЭЛЛЕРТ О.Г. Фотокаталитические свойства сложного оксида $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ со структурой пирохлора.....	424
ЮРЧЕНКО Д.А., ПИЧУГИН И.С., ИГНАТЬЕВ А.И. Влияние сурьмы на образование наночастиц серебра в фототерморефрактивных стеклах.....	426
ПИЧУГИН И.С., ИГНАТЬЕВ А.И., ИВАНОВ С.А., КОЗЛОВА Д.А. Германосиликатные фототерморефрактивные стекла.....	428
ПИЧУГИН И.С., ИГНАТЬЕВ А.И., КОЗЛОВА Д.А., ОРЕШКИНА К.В. Влияние концентрации галогенов на голографические и спектральные свойства фототерморефрактивных стекол.....	430

КАРЦЕВ П.Ф., КУЗНЕЦОВ И.О. Учёт взаимодействия с внешним электромагнитным полем при моделировании системы поляритонов в резонаторе методом квантового Монте-Карло.....	432
АВЕРБУХ Б.Б., АВЕРБУХ И.Б. Условие реализации оптического магнитного зеркала с точки зрения молекулярной оптики.....	434
МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ Д.В. Калибровка сечений многофотонной ионизации атомов по сечениям их электронной ионизации.....	436
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В. Рэлеевское рассеяние двух фотонов атомом.....	438
СЕМЕНОВА Л.Е. Рассеяние света при двухфотонном возбуждении вблизи резонанса с $A_{n=2}$ экситонным уровнем в кристалле GaN.....	440
АСТАШКЕВИЧ С.А. Энтропия Шеннона и информация Фишера молекулы H_2^+	442
АВЕРБУХ Б.Б., АВЕРБУХ И.Б. Выход области существования обратных волн за пределы метаматериала и невозможность реализации суперлинзы.....	444
АРХИПОВ Д.Н., АСТАШКЕВИЧ С.А., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В. Изучение динамики фотоионизации иона молекулы водорода траекторным методом.....	446
ЗВИНЕНКО К.К., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СЕРГЕЕВ М.М. Структурирование кварцевого стекла ультракороткими лазерными импульсами различных длин волн.....	448
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Формирование нанорешеток в системе УКИ лазерное излучение – металлоорганический газ – осаждаемый металл – сапфир в синергетическом интерференционном поле с участием волноводных мод.....	450
МИНИНА О.В. Режим волновода при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе.....	452
СМАЕВ М.П., ДОРОФЕЕВ В.В., ОХРИМЧУК А.Г. Формирование одномодового волновода в объеме теллуридного стекла с помощью фемтосекундных лазерных импульсов.....	454
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Микроструктурирование стекла импульсом наносекундного излучения и универсальная поляритонная модель.....	456
СИБЕРС А.Н., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СЕРГЕЕВ М.М., КОСТЮК Г.К., ВЕЙКО В.П., АНФИМОВА И.Н., АНТРОПОВА Т.В. Лазерно-индуцированное формирование молекулярных барьеров в пористом стекле.....	458

ЧЖУН Л., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СЕРГЕЕВ М.М., ВЕЙКО В.П., ГИРСОВА М.А., АНТРОПОВА Т.В.	
Пространственно-селективная стабилизация активных центров V_i внутри пористого стекла лазерными импульсами.....	460
ДЕМИДОВ В.В., АНАНЬЕВ В.А., ТЕР-ПЕРСЕСЯНЦ Е.В.	
Делокализация высшей моды в лазерных микроструктурированных световодах с предельно низкоразмерной симметрией.....	462
ДЕМИДОВ В.В., ЛЕОНОВ С.О., АНАНЬЕВ В.А., ТИГАЕВ В.О., ЕЛИСТРАТОВА Е.А.	
Исследование модового состава и спектрального пропускания антирезонансных микроструктурированных световодов с полой сердцевинной диаметром 50 мкм.....	464
ГАНИН Д.В., ЛАПШИН К.Э., ВАРТАПЕТОВ С.К.	
Методы удлинения области взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с прозрачными материалами для прецизионной высокоскоростной обработки материалов.....	466
ВЕЙКО В.П., ЛЬОНГ В.К., ОДИНЦОВА Г.В., РОМАНОВ В.В., ЯЦУК Р.М.	
Оптимизация технологии цветной лазерной маркировки металлов для промышленного применения.....	468
ГАЛУШКИН М.Г.	
Особенности теплофизических параметров газолазерной наплавки порошков.....	470
ЯББАРОВА Д.Р., САЛИХОВ Р., ХАБИБУЛЛИНА Л.В.	
Графитизация поверхности углеродного волокна при лазерной резке углепластика.....	472
ГАЛУШКИН М.Г.	
Определение давления отдачи паров и зависимости его от скорости сканирования пучка в процессе лазерной сварки с глубоким проплавлением.....	474
ЯББАРОВА Д.Р., САЛИХОВ Р., ХАБИБУЛЛИНА Л.В.	
Измерение зоны термического влияния реза УУКМ лазерным излучением методами оптической микроскопии.....	476
МАКСИМОВА С.В., КОВАЛЬ В.В., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., ШАХНО Е.А., КУЗИВАНОВ М.О., МОРОЗОВ Ю.С.	
Окисление пленок титана пикосекундными лазерными импульсами в схеме многолучевой интерференции.....	478
КОПЬЕВ П.С., ЛЕНТОВСКИЙ В.В., ФЁДОРОВ Д.Л.	
Разработка конструкции мощных полупроводниковых лазеров для дистанционного энергообеспечения.....	480
БАЗЗАЛ Х., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П., ЛЫЧКОВСКИЙ В.В.	
Влияние формы канала на процессы образования AlN при воздействии на алюминиевую мишень сериями сдвоенных лазерных импульсов.....	482

КОЗЛОВСКИЙ К.И., ЛИСОВСКИЙ М.И., МЕЛЕХОВ А.П., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А.	
Терагерцовое излучение малоиндуктивного разряда в вакууме с лазерно-плазменным иницированием.....	484
КОЗЛОВСКИЙ К.И., МЕЛЕХОВ А.П.	
Оптимизация условий генерации терагерцового излучения плазмой лазерно-инициируемой вакуумной искры.....	486
КОВАЛЬ В.В., РЫМКЕВИЧ В.С., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СЕРГЕЕВ М.М., МОРОЗОВ Ю.С.	
Повышение разрешающей способности лазерно-индуцированной микроплазмы.....	488
ШИЛОВА Г.В., СИРОТКИН А.А., ЗВЕРЕВ П.Г.	
Лазер с длиной волны излучения 563 нм.....	490
ВАСИЛЬЦОВ В.В., ГАЛУШКИН М.Г.	
Моделирование параметров газового терагерцового лазера с накачкой излучением волноводных CO ₂ лазеров.....	492
КОЛЯДИН А.Н., АСТАПОВИЧ М.С., ГЛАДЫШЕВ А.В., КОСОЛАПОВ А.Ф., ПРЯМИКОВ А.Д., АЛАГАШЕВ Г.К., ХУДЯКОВ М.М., ЛИХАЧЕВ М.Е., БУФЕТОВ И.А.	
Оптимизация дизайна и экспериментальное исследование рамановского волоконного лазера на 4.4 мкм на основе револьверного кварцевого световода, заполненного водородом.....	494
РОГОЖИН М.В., РОГАЛИН В.Е., КРЫМСКИЙ М.И.	
Термостабилизация лазерных диодов с помощью криоаккумулятора.....	496
МОЖАЕВ Р.К., ЧЕРНЯК М.Е.	
Исследование стойкости лазерных диодов на квантовых ямах и гетерозипитаксиальных фотодиодов в составе оптоволоконных модулей к воздействию гамма-квантов и нейтронов.....	498
МАЛОВ А.Н., НЕБОГИН С.А., ВАЙЧАС А.А.	
Влияние лазерного излучения на планарную кристаллизацию биоорганических растворов.....	500
КОВАЛЕНКО А.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н., АЛЬТШУЛЕР Г.Б., ВИННИЧЕНКО В.А.	
Сравнение лазера с длиной волны 442 нм с Ho:YAG (2100 нм), волоконным Tm (1940 нм) и КТР (532 нм) лазерами для абляции мягких тканей.....	502
ДУДОВА Д.С., БАРДАКОВА К.Н., МИНАЕВ Н.В., ТИМАШЕВ П.С.	
Лазерно-индуцированное формирование функциональных матриц для биомедицины.....	504
НЕУПОКОЕВА А.В., МАЛОВ А.Н., НЕБОГИН С.А.	
Изучение влияния лазерного облучения на структуру белковых растворов методом анализа кристаллограмм.....	506
ТИМЧЕНКО П.Е., ТИМЧЕНКО Е.В., ВОЛОВА Л.Т., ФРОЛОВ О.О., КИЙКО Н.К., КУЛАБУХОВА А.Ю.	
Оптическая оценка имплантатов, изготовленных на основе твердой мозговой оболочки.....	508

КОКОРИНА Л.А., МАЛОВ А.Н., НЕУПОКОЕВА А.В., ТРЕТЬЯКОВА М.Н. Исследование влияния лазерной активации питательной среды на динамику роста микроорганизмов.....	510
ВИННИЧЕНКО В.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н., АЛЬТШУЛЕР Г.Б., ЯРОСЛАВСКИЙ И.В., КОВАЛЕНКО А.А. Применение суперимпульсного тулиевого волоконного лазера для литотрипсии.....	512
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ПИСАРЕВА Е.В., ВЛАСОВ М.Ю., ВОЛОВА Л.Т., ТЮМЧЕНКОВА А.С., ФЕДОРОВА Я.В. Спектральные исследования костной ткани крыс при моделировании остеопороза и эффективности лечения гидроксипатитом.....	514
ГУБИН М.Ю., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГЛАДУШ М.Г., ПРОХОРОВ А.В. Особенности генерации плазмон-поляритонных импульсов на основе кооперативных эффектов в волноводном спазере.....	516
СЁМКИН А.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н., ДОЛГИРЕВ В.О., СОН Д.И. Преобразование гауссовых световых пучков в бесселеподобные голографическими дифракционными элементами в ФПМ-ЖК, управляемыми внешним электрическим полем.....	518
ХАЛИЛОВ С.И., РЫБАСЬ А.Ф., ИБРАГИМОВ А.Э., ЯВОРСКИЙ М.А., АЛЕКСЕЕВ К.Н., СОКОЛЕНКО Б.В. Вихревой волоконно-оптический фильтр.....	520
ТАШТИМИРОВА Д.У., САВЧЕНКО Е.А., АКСЕНОВ Е.Т., КУПЦОВ В.Д. Оптический пинцет на основе бесселевых пучков.....	522
ГОРЯЧЕВ Л.В. Необходимость учета рассеянного света при решении дифракционных задач.....	524
ГОРЯЧЕВ Л.В. Введение понятия коэффициента рассеяния при решении дифракционных задач.....	526
КАРЕВ П.В. Ультразвуковые пьезодвигатели для оптической стабилизации.....	528
ХАРАСОВ Д.Р., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А. Пьезорезонансный датчик температуры активного волокна.....	530
БОРОДАКО К.А., ДМИТРИЕВА К.А., ШЕЛЯКОВ А.В., ИВАНОВ А.А., ТИМОФЕЕВ А.А. Применение лазерного излучения для создания микромеханического привода на основе обратимого эффекта памяти формы.....	532
НЕМЕЦ В.М., ПЕГАНОВ С.А. Дисперсионный анализ в исследовании спектров среднего ИК-диапазона автомобильного топлива.....	534

МАВРИЦКИЙ О.Б., ЧУМАКОВ А.И., ЕГОРОВ А.Н., ПЕЧЕНКИН А.А., САВЧЕНКОВ Д.В. Метод тестирования электронных приборов на радиационную стойкость, основанный на локальном облучении ультракороткими лазерными импульсами.....	536
САБАЙДАШ С.Ю., БОЙЧЕНКО А.П., ШИШКАНОВ О.Н. Технология полихромного выделения оптических градиентов на электрополевых изображениях из частиц серебра.....	538
ИСМАИЛОВ Ш.М., КАМЕНЕВ В.Г. Регистрация эффекта когерентного обратного рассеяния от клиновидных образцов, содержащих частицы корунда.....	540
АДАМОВ А.А., БАРАНОВ М.С., ХРАМОВ В.Н., АБДРАХМАНОВ В.Л., ГОЛУБЕВ А.В., ЧЕЧЕТКИН И.А. Повышение разрешения световых меток при измерении толщины роговичного слоя глаза в методе лазерной триангуляции.....	542
ПОТЛОВ А.Ю., ФРОЛОВ С.В., ПРОСКУРИН С.Г. Доплеровское картирование турбулентных потоков биологических жидкостей с помощью оптической когерентной томографии.....	544
ПОДЛЕСНЫХ А.А., КАМЕНЕВ О.Т., ПЕТРОВ Ю.С. Использование разветвителя 3×3 в волоконно-оптическом деформометре на основе интерферометра Маха-Цендера.....	546
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д. Миниатюрный тепловизионный прибор для беспилотного летательного аппарата.....	548
АБРАМОВА А.А., ГАВРУШКО В.В., САПОЖНИКОВ А.А. Двухцветные фотоприемники для спектрального диапазона 0,4 - 2,3 мкм.....	550
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д. Видеокамера для контроля в ультрафиолетовой области спектра.....	552
БЫЛИНА М.С., ГЛАГОЛЕВ С.Ф. Сравнение предельных возможностей фотоприемных устройств с лавинным фотодиодом и с оптическим усилителем.....	554
КАЛАШНИКОВ Е.В., МИЛОВИДОВ В.С., ЧАРУХЧЕВ А.В. Дистанционные измерения параметров объекта по его изображениям на дисплее.....	556
СКОРНЯКОВА Н.М., ЕВТИХИЕВА О.А. Влияние размера движущейся частицы на доплеровский сигнал в приближении гауссова пучка.....	558
БУСУРИН В.И., ЖЕГЛОВ М.А., МУЛИН П.В., КОРОБКОВ К.А., БУЛЫЧЕВ Р.П. Обеспечение балансировки резонатора с осесимметричной структурой в твердотельном волновом гироскопе.....	560
ЕВТИХИЕВА О.А., КАИНГ С.М., РИНКЕВИЧЮС Б.С. Рефракция плоского оптического пучка в прозрачной неоднородной среде..	562

БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., МУЛИН П.В., ФАМ А.Т., ДАНГ В.Х. Разработка рамочного МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием сигналов на основе интерферометра Фабри-Перо.....	564
ИВАНОВА Ю.В., ЛАПИЦКИЙ К.М. Разработка алгоритмов коррекции искажений цифровых изображений, полученных теневым фоновым методом.....	566
ШЕВКУНОВ И.А., ПЕТРОВ Н.В., КАТКОВНИК В.Я. Вычислительное пиксельное суперразрешение в безлинзовой осевой цифровой голографии.....	568
ГАРНАЕВА Г.И., НЕФЕДЬЕВ Л.А., ХАКИМЗЯНОВА Э.И., АХМЕДШИНА Е.Н. Частотно-временная фильтрация сигналов в эхо-голографии.....	570
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С. Математическое моделирование работы инвариантного оптического коррелятора при наличии дополнительной фазовой модуляции амплитудного ПВМС.....	572
КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А. Экспериментальное исследование коррелятора совместного преобразования.....	574
ЕВТИХИЕВА О.А., СКОРНЯКОВА Н.М. Моделирование создания дифракционного оптического элемента с помощью бесселева пучка.....	576
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М. Методика визуализации дефектов отдельной компоненты составного дифракционного оптического элемента.....	578
ГОНЧАРОВ Д.С., МОЛОДЦОВ Д.Ю., ПОНОМАРЕВ Н.М., ПЬЯНКОВ С.С., РОДИН В.Г., СТАРИКОВ Р.С. Измерение профиля поверхности микрозеркального ПВМС интерферометрическим методом.....	580
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М. Контроль качества прозрачных подложек дифракционных оптических элементов.....	582
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А., ХАЗВАЛИЕВА Д.Р. Перенос голографической структуры со слоев бихромированного желатина на полиметилметакрилат.....	584
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х., ЖУМАЛИЕВ К.М., АЛЫМКУЛОВ С.А. Температурная зависимость дифракционной эффективности голограмм, записанных на фототермопластический носитель.....	586
ЧЕБУРКАНОВ В.Д., ТАЛАЛАЕВ В.Е., ЦЫГАНОВ И.К., КОЛЮЧКИН В.В., ОДИНОКОВ С.Б., ПИРЮТИН Н.В. Программно-аппаратный комплекс для экспертно-криминалистических исследований по диагностике и идентификации защитных голограмм.....	588

ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А. Коррекция нулевого порядка мультиплексированных компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, записанных в схеме некогерентной проекции.....	590
ХАНЕВИЧ П.А., ОДИНОКОВ С.Б., ДОНЧЕНКО С.С., СЕМИШКО С.А. Разработка алгоритма наведения оптической системы считывания на мультиплексированные одномерные микроголограммы Фурье для оптико-голографической системы архивной памяти.....	592
КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Восстановление объектов с помощью compressive sensing из однопиксельных регистраций при использовании DMD-модулятора.....	594
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ТЫНЫШОВА Т.Д., АЛЫМКУЛОВ С.А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной.....	596
КРАСНОВ В.В., МИНАЕВА Е.Д., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А., ШИФРИНА А.В. Методы повышения точности оптического восстановления изображений с киноформов.....	598
Именной указатель авторов.....	600

В.П. МИНАЕВ
НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино

О ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТКАНИ

При воздействии лазерного излучения на биологические ткани проявляются физические и биофизические эффекты, используя которые можно варьировать результат такого воздействия с целью оптимизации методик лечения. К ним относятся лазериндуцированные явления запуска фиброзной трансформации патологических тканей, релаксации напряжений в хряще, сокращения волокон коллагена, гидродинамические эффекты, а также процессы, происходящие при карбонизации биоткани.

V.P. MINAEV
IRE-Polus Corporation, Fryazino

PHYSICAL EFFECTS AT THE ACTION OF LASER LIGHT ON BIOLOGICAL TISSUE

At the action of the laser radiation on biological tissues, there are exist physical and biophysical effects, using which it is possible to vary result of such influence for the purpose of the treatment techniques optimization. The laser-induced phenomena of the pathological tissues fibrous transformation, relaxation of the cartilage strains, reductions of the collagen fibers, hidrodynamic effects and also the processes happening at a biotissue carbonization concern them.

От длины волны лазерного излучения существенным образом зависит величина его поглощения в основных хромофорах биологических тканей – воде и гемоглобине. В свою очередь, эта величина определяет, на какую глубину проникнет излучение и в слое какой величины будет выделяться его энергия, которая при медицинских применениях чаще всего преобразуется в тепло.

Нагрев до температуры выше примерно 42,5°C ведет к проявлению теплового повреждения ткани, которое вызывает асептическое воспаление, запускающее процесс преобразования в соединительную ткань (фиброзная трансформация), регенерации хрящевой ткани при лечении хрящей межпозвоковых дисков и суставов. Это явление используется при лазериндуцированной интерстициальной термотерапии (ЛИТТ) злокачественных и доброкачественных опухолей, разнообразных

кист, при лечении варикозно расширенных вен методом эндовенозной лазерной коагуляции (ЭВЛК). Процесс неоваскулогенеза (образования капилляров) в образующейся фиброзной ткани лежит в основе лечения ишемической болезни сердца методом трансмикардиальной лазерной реваскуляризации (ТМЛР).

Нагрев волокон коллагена ведет к их сокращению. Это явление лежит в основе «омоложения кожи» методом фракционного фототермолиза, неабляционных методов коррекции рефракционных дефектов зрения.

Лазер-индуцированная релаксация напряжений в хрящевой ткани проявляется в обратимой потере упругости хряща при кратковременном нагреве его до температуры около 70°C. Этот эффект лежит в основе метода коррекции носовой перегородки и ушных раковин методом лазерной термопластики хряща.

Нагрев тканей ведет к появлению газов из-за уменьшения их растворимости. Образующиеся при этом газовые пузырьки позволяют восстановить пористости роговицы, что позволяет бороться с глаукомой.

При использовании излучения, сильно поглощаемого в воде, или специального чернения торца световода при работе в водной среде реализуется режим сверхинтенсивного. При этом формируется двухфазная (разогретая вода и пар) струя, которая может переносить тепло или рассекать биоткани. А проявляющаяся при этом кавитация создает ударные волны, способные разрушать камни в урологии (литотрипсия). Кроме этого камни разрушаются при закипании воды, содержащейся в их порах и резким увеличением при этом давления.

Карбонизация биологических тканей ведет к сильному увеличению коэффициента поглощения и разогреву при контактном воздействии конца световода, При этом реализуется сочетанное воздействие на ткань излучения и разогретого конца световода. Повышается эффективность удаления ткани при рассечении или абляции.

Избавиться от карбонизации при необходимости можно переходом на излучение, поглощаемое не гемоглобином, а водой, которая при нагреве до температуры 100°C начинает испаряться, и поступающая энергия идет при этом на преодоление скрытой теплоты парообразования, и температура не достигает 250°C, при которых начинается карбонизация.

Таким образом, учет физических и биофизических процессов, происходящих во время воздействия мощного лазерного излучения на биологические ткани при различных вмешательствах позволяет варьировать результат этого воздействия с целью оптимизации методик лечения.

В. КОВАНИС^{1,2}

¹*Назарбаев университет, Астана, Казахстан*

²*Университет Центральной Флориды, Орlando, США*

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАДИГМЫ НЕЭРМИТОВОЙ ФОТОНИКИ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ СОЗДАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ МЕТАМОЛЕКУЛЫ

В этом выступлении я расскажу о недавних теоретических работах о том, как создавать и анализировать новый фотонный метаатом неэрмитовской фотоники, который состоит из двух оптически связанных блоков усиления, индивидуально направленных, так что неоднородности накачки могут вызывать потребность в усилении и потерях.

V. KOVANIS^{1,2}

¹*Nazarbaev University, Astana, Kazakhstan*

²*University of Central Florida, Orlando, Florida, USA*

PARADIGM SHIFT IN NON-HERMITIAN PHOTONICS VIA AN OPTICAL META-MOLECULE

In this talk I will cover recent theoretical work on how to build and dissect the new photonic-metaatom of the non-Hermitian photonics that consists of two optically coupled gain blocks individually addressed so that pump inhomogeneities can induce the gain and loss requirement.

Мною была проделана теоретическая работа по построению и описанию нового фотонного мета-атома неэрмитовой фотоники, который состоит из двух оптически связанных усилителей с индивидуальным управлением так, что неоднородная накачка может вызвать усиление или поглощение в оных, в зависимости от необходимости. Эта крайне простая модель, основана на нелинейном скоростном уравнении [1], включает в себя сильную связь амплитуды, фазы и оптическую фазовую отстройку. Опираясь на соответствующих эволюционные уравнения, были определены форма спектральной линии, спектральные свойства перехода и показано, что в общем случае, возникают исключительные точки, не ограниченных РТ-симметрией (то есть симметриями относительно обращения времени и четности), как в случае модели связанных мод. Тем самым происходит сдвиг парадигмы в область неэрмитовой фотоники. Оптические сигнатуры в системе бифуркаций, таких как бифуркации

Хопфа и исключительные точки [2], проявляются в виде эффектов самовыключения и наблюдаемых характеристик спектральной линии, которыми можно управлять, меняя отстройку оптических частот и неоднородную накачку. В сущности, было обнаружено, что основной активный фотонный димер – это объект типа расщепленного кольцевого резонатора. Этот мета-атом характеризуется богатой и сложной диаграммой устойчивости в пространстве оптической связи и частотной отстройки, что позволяет создавать новые конструкции фотонных интегральных схем. Намечен путь к простому и мощному методу планированию новых экспериментов для проверки функциональности и перенастройки фотонных интегральных схем, которые могут быть использованы в качестве центральных элементов для ультрачувствительных датчиков [3], настраиваемых фотонных генераторов [4], лазеров на основе топологических изоляторов [5] и различных фазированных решеток фотонных излучателей [6]. Кроме того, по моему мнению, можно утверждать, что эти исследования могут стать плацдармом для разработки следующего поколения оптических интегральных генераторов, которые излучают разнообразные желаемые виды излучения для интегрального лазерного радара и микроволновых фотонных приложений, а также исследования новых примеров коллективного поведения, включая турбулентные химеры [7], что в конечном итоге позволит вступить в эру фотонных аналоговых процессоров [8].

Список литературы

1. Kominis Y., Kovanis V., Bountis T. Spectral Signatures of Exceptional Points and Bifurcations in the Fundamental Active Photonic Dimer // arXiv:1710.01687. 2017.
2. Hodaiei H., Hassan A.U., Wittek S., Garcia-Gracia H., El-Ganainy R., Christodoulides D.N., Khajavikhan M. Enhanced sensitivity at higher-order exceptional points // Nature. 2017. V.548. P.87-191.
3. Ren J., Hodaiei H., Harari G., Hassan A.U., Chow W., Soltani M., Christodoulides D.N., Khajavikhan M. Ultrasensitive micro-scale parity-time-symmetric ring laser gyroscope // Optics Letters. 2017. V.42. P.1556-1559.
4. Simpson T.B., Liu J.-M., Al Mulla M., Usechak N.G., Kovanis V. Limit-Cycle Dynamics with Reduced Sensitivity to Perturbations // Physical Review Letters. 2014. V.112. P.023901.
5. Wittek S., Harari G., Bandres M.A., Hodaiei H., Parto M., Aleahmad P., Rechtsman M.C., Chong Y., Christodoulides D.N., Khajavikhan M., Segev M. Towards the Experimental Realization of the Topological Insulator Laser // CLEO: QELS Fundamental Science. 2017.
6. Valagiannopoulos C.A., Kovanis V. Judicious distribution of laser emitters to shape the desired far-field patterns // Physical Review A. 2017. V.95. P.063806.
7. Shena J., Hizanidis J., Kovanis V., Tsironis G.P. Turbulent chimeras in large semiconductor laser arrays // Scientific Reports. 2017. V.7. P.42116.
8. Nixon M., Ronen E., Friesem A.A., Davidson N. Observing geometric frustration with thousands of CO upled lasers // Physical Review Letters. 2013. V.110. P.184102.

Н.Д. КУНДИКОВА^{1,2}

¹*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

²*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург*

ИЗВЕСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА И ПРЕДСКАЗАНИЕ НОВЫХ ЭФФЕКТОВ

Известные эффекты проявления спин-орбитального взаимодействия света можно рассматривать как результат попарного взаимовлияния трех составляющих углового момента светового поля и разделить все известные эффекты на эффекты шести типов, которые могут проявляться в различных условиях. Такая классификация позволяет предположить, что возможно совместное влияние двух типов углового момента на третий, то есть, могут существовать еще три типа новых эффектов спин-орбитального взаимодействия света.

N.D. KUNDIKOVA^{1,2}

¹*Soul Ural State University, Chelyabinsk*

²*Institute of Electrophysics UB RAN, Ekaterinburg*

THE KNOWN EFFECTS OF THE SPIN-ORBIT INTERACTIONS OF LIGHT AND PREDICTION OF NEW EFFECTS

The known effects of the manifestation of the spin-orbit interaction of light can be considered as the result of a pair interaction of the three components of angular momentum of a light field and all the known effects can be divided into six types of effects that can occur under different conditions. This classification suggests that it is possible to predict the joint influence of two types of angular momentum on the third, that is, there can be three new types of effects of the spin-orbit interaction of light.

Векторный световой пучок обладает угловым моментом, который имеет три составляющих. Это спиновый угловой момент, который связан с поляризацией, внешний орбитальный угловой момент, который определяется траекторией светового пучка, а также внутренний орбитальный угловой момент, связанный со структурой светового поля в поперечном сечении пучка.

Влияние одной из компонент углового момента на другую приводит к спин-орбитальному взаимодействию света (фотона). Рассмотрим, как проявляются взаимодействия угловых моментов света.

Влияние спинового углового момента на внешний орбитальный угловой момент проявляется в продольном смещении центра тяжести линейно поляризованного и поперечном смещении циркулярно поляризованного пучка при отражении и преломлении. Эти смещения известны как сдвиг Гуса-Ханхена, сдвиг Федорова-Имбера, эффект Холла для света и оптический эффект Магнуса.

Влияние внешнего орбитального углового момента на спиновый угловой момент проявляется в повороте линейной поляризации света при изменении траектории света. Эффект известен как поворот Рытова-Владимирского-Берри-Чо-Томиа, наблюдался при распространении линейно поляризованного света через одномодовое волокно, скрученное в спираль, возможен и в прямолинейном многомодовом волокне.

Влияние внутреннего орбитального углового момента на внешний орбитальный угловой момент проявляется при отражении и преломлении светового пучка с сингулярностью как сдвиг центра тяжести пучка.

Влияние внешнего орбитального углового момента на внутренний орбитальный угловой момент проявляется в изменении структуры поля пучка при изменении траектории, по которой свет распространяется. Экспериментально эффект наблюдался как поворот спекл-картины света, прошедшего через оптическое волокно, скрученное в спираль, при изменении шага спирали.

Влияние спинового углового момента на внутренний орбитальный угловой момент наблюдалось как преобразование пучка с ненулевым спиновым угловым моментом и нулевым орбитальным угловым моментом в пучок с ненулевым внутренним орбитальным угловым моментом и нулевым спиновым. Такое преобразование возможно при прохождении света через q-пластинки, оптическое волокно, при рассеянии на поверхностных неоднородностях.

Предлагаемая классификация эффектов спин-орбитального взаимодействия света показывает, что есть возможность поиска условий, в которых могут быть обнаружены три новых эффекта спин-орбитального взаимодействия света, которые связаны с совместным влиянием двух типов углового момента на третий. Возможно совместное влияние спинового углового момента и внутреннего орбитального углового момента на внешний орбитальный угловой момент, совместное влияние внешнего орбитального углового момента и внутреннего орбитального углового момента на спиновый угловой момент, а также совместное влияние спинового углового момента и внешнего орбитального углового момента на внутренний орбитальный угловой момент.

А.Л. АНДРЕЕВ¹, Т.Б. АНДРЕЕВА¹, Н.В. ЗАЛЯПИН¹,
И.Н. КОМПАНЕЦ^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В специально разработанных негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК) с периодическими деформациями смектических слоев исследован характер переориентации электрическим полем главной оптической оси в зависимости от частоты и напряженности поля и параметров СЖК.

A.L. ANDREEV¹, T.B. ANDREEVA¹, N.V. ZALYAPIN¹,
I.N. KOMPANETS^{1,2}

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

REORIENTATION OF NOVEL LIQUID CRYSTAL FERROELECTRIC IN AN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

In specially designed helix-free FLC with periodic deformations of smectic layers, the nature of electrically controlled reorientation of the main optical axis was studied, depending on the frequency and intensity of the electric field and FLC parameters.

Рассматриваются специально разработанные негеликоидальные СЖК, в объеме которых наблюдаются пространственно-неоднородные структуры с периодическими деформациями смектических слоев.

Характер переориентации главной оптической оси – директора в СЖК при взаимодействии переменного электрического поля E со спонтанной поляризацией P_S зависит от того, который из двух диссипативных коэффициентов – вращательная или сдвиговая вязкость, преобладает. Если это – вращательная вязкость γ_φ , то переориентация директора происходит практически одновременно во всех смектических слоях, а время переориентации, и как следствие, время электрооптического отклика τ_R не зависят от частоты изменения электрического поля, причём $\tau_R \sim \gamma_\varphi / P_S \cdot E$. Например, для СЖК-ячейки толщиной 1,7 мкм с композицией HF-32B, время τ_R не зависит от частоты изменения поля, если частота не превышает 70 Гц. В этом частотном диапазоне время релаксации

директора СЖК в невозмущенное состояние после выключения электрического поля также не зависит от частоты изменения поля.

Изменение канала диссипации энергии, то есть переход к сдвиговой вязкости γ_ψ на частотах, превышающих обратное время максвелловской релаксации, сопровождается сильной частотной зависимостью времени оптического отклика. Так, в диапазоне частот управляющего напряжения от 100 до 200 Гц время τ_R уменьшается практически в два раза.

Преобладание сдвиговой вязкости и влияние нелинейности среды приводят к появлению солитонов, движение которых ориентирует директор во всем объеме СЖК. Время переориентации директора и время оптического отклика определяются скоростью солитонных волн. Переход к солитонной моде также происходит на фиксированной частоте при увеличении напряженности поля и сопровождается резким уменьшением времени τ_R при достижении некоторого порогового значения напряженности поля, причем это значение при увеличении частоты возрастает, а время τ_R уменьшается. С другой стороны, практически сразу после перехода в солитонную моду, появляется участок зависимости $\tau_R(E)$, где время оптического отклика не зависит от напряженности поля, т.е. сдвиговая вязкость также перестает зависеть от напряженности поля.

Увеличение периода деформации слоев до $3,5\div 4$ мкм в композиции *HF-32F* приводит к значительному росту (более чем в три раза) порогового значения электрического поля, при достижении которого происходит переход к солитонной моде. Отметим также, что переход к максвелловскому механизму диссипации энергии с преобладанием сдвиговой вязкости ослабляет температурную зависимость времени оптического отклика в широком интервале температур, порядка $10\text{-}50$ °С.

Непрерывное изменение положения директора СЖК вдоль каждого смектического слоя является причиной плавного изменения электрическим полем двулучепреломления Δn (зависящего также от частоты f управляющего напряжения) и практически безгистерезисной зависимости светопропускания СЖК- ячейки от амплитуды напряжения. Частота напряжения соответствует частотному интервалу существования солитонной моды (для композиции *HF-32C* от 100 Гц до 7 кГц), за исключением статических (низкочастотного и высокочастотного) участков зависимости $\Delta n(f)$. Последнее обстоятельство не позволяет получить безгистерезисную зависимость светопропускания при частоте выше 6 килогерц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0191.

Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ, Н.А. ТЕПЛЯКОВА,
Д.В. МАНУКОВСКАЯ, А.В. СЮЙ¹, Е.О. КИЛЕ¹, Д.С. ШТАРЕВ^{1,2}

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

¹*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

²*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск*

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ШИРИНА ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Методами фотоиндуцированного рассеяния света и оптической спектроскопии исследованы эффект фоторефракции и определена ширина запрещенной зоны номинально чистых конгруэнтных и стехиометрических кристаллов ниобата лития, а также серии легированных кристаллов LiNbO_3 .

N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV, N.A. TEPLYAKOVA,
D.V. MANUKOVSKAYA, A.V. SYUY¹, E.O. KILE¹, D.S. SHTAREV^{1,2}

*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Materials of the Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

¹*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

²*Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin FEB RAS, Khabarovsk*

PHOTO-ELECTRIC FIELDS AND BAND GAP IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

Band gap was determined and photorefractive effect was researched for nominally pure congruent and stoichiometric lithium niobate crystals, as well as a series of doped LiNbO_3 crystals, by methods of photoinduced light scattering and optical spectroscopy.

Методами фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) и оптической спектроскопии исследованы фоторефрактивные свойства, проводимость и определена ширина запрещенной зоны серии монокристаллов LiNbO_3 , легированных катионами Mg^{2+} , Zn^{2+} , V^{3+} , Gd^{3+} , Y^{3+} , Er^{3+} , а также монокристаллов двойного легирования: $\text{Mg}^{2+}:\text{Gd}^{3+}$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Ta}^{5+}$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Y}^{3+}$, перспективных в качестве материалов для преобразования частоты, электрооптических модуляторов и затворов, оптических материалов с микронными и субмикронными периодическими структурами. Полученные результаты сравнивались с результатами для номинально чистого конгруэнтного и стехиометрического ($\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$) кристаллов.

По параметрам края фундаментального поглощения рассчитана ширина запрещенной зоны, а по параметрам индикатрисы ФИРС – фотовольтаическое и диффузионное поля в кристаллах. Наиболее низкое значение ширины запрещенной зоны характерно для кристаллов LiNbO_3 _{стех}, $\text{LiNbO}_3:\text{B}(0.12 \text{ вес. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.011):\text{Ta}(1.13)$, $\text{LiNbO}_3:\text{Y}(0.46)$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.63):\text{Y}(0.24)$. Обнаружена корреляция в значениях ширины запрещенной зоны, электропроводности, величин фотоэлектрических полей, величин и временной зависимости параметров индикатрисы ФИРС. За эффект фоторефракции в кристалле LiNbO_3 ответственны дефекты с локализованными на них электронами в виде глубоких и мелких ловушек электронов. За состояние края фундаментального поглощения – структурная однородность кристалла, которая в номинально чистых конгруэнтных кристаллах выше, чем в легированных конгруэнтных кристаллах. Основными дефектами в номинально чистых конгруэнтных и легированных конгруэнтных кристаллах являются дефекты Nb_{Li} и дефекты в виде мелких ловушек электронов. Причем, чем больше величина $R = \text{Li}/\text{Nb}$, тем меньше в кристалле дефектов Nb_{Li} , но одновременно тем больше дефектов в виде мелких ловушек электронов. В высокоупорядоченном стехиометрическом кристалле дефекты Nb_{Li} отсутствуют и эффект фоторефракции обусловлен преимущественно наличием мелких ловушек электронов, число которых в нем существенно больше, чем в конгруэнтном кристалле.

Из полученных данных следует, что чем большие фотоэлектрические поля создаются в кристалле, тем больше эффект фоторефракции, тем больше индикатриса ФИРС. Величина угла и скорость раскрытия спекл-структуры индикатрисы ФИРС определяют фоторефрактивную чувствительность и быстродействие записи информации. Таким образом, в зависимости от состава величина эффекта фоторефракции, ФИРС, фото- и электропроводность в кристалле LiNbO_3 изменяются в широких пределах. При этом происходит изменение ширины запрещенной зоны, которая для конгруэнтного кристалла, составляет 3.72 эВ, что близко к значению, характерному для широкозонных полупроводников. Уменьшая ширину запрещенной зоны, можно приблизить свойства кристалла LiNbO_3 к полупроводниковым, что может позволить в принципе разрабатывать оптические материалы с кросс-эффектами.

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, А.Е. МАНДЕЛЬ,
А.Р. АХМАТХАНОВ¹, В.Я. ШУР¹

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПРИЛОЖЕННЫМ СИНУСОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ

Экспериментально установлено, что интенсивности брэгговских максимумов при дифракции лазерного пучка во внешнем электрическом поле с частотой Ω на сформированной электрической переполяризации в кристалле $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$ периодической доменной структуре являются суперпозицией составляющих с частотами 0 , Ω и 2Ω , амплитуды которых растут с приложенным напряжением линейно для первой гармоники и квадратично – для нулевой и второй гармоник.

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, A.E. MANDEL,
A.R. AKHMATKHANOV¹, V.Ya. SHUR¹

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
¹Ural Federal University, Ekaterinburg*

LIGHT DIFFRACTION ON PERIODICALLY POLED DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL IN AN APPLIED SINUSOIDAL VOLTAGE

We experimentally established that the intensities of Bragg maxima observed under the external electric field with a frequency of Ω at the diffraction of laser beam on the periodically poled domain structure developed in the $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$ crystal using electric-field poling, are the superposition of components with the frequencies equal to 0 , Ω and 2Ω . With applied voltage the amplitudes of these components increase linearly and quadratically for the 1st harmonic and for 0th and 2nd ones, respectively.

Использование периодически поляризованных доменных структур (ППДС) в кристаллах ниобата лития позволяет реализовать брэгговские дефлекторы лазерного излучения с низкими значениями управляющего постоянного напряжения [1]. Амплитудная модуляция дифрагированного пучка возможна в случае приложения к такому дефлектору переменного напряжения.

В работе проведено экспериментальное исследование брэгговской дифракции света на ППДС с пространственным периодом $\Lambda = 8.79$ мкм и

доменными стенками, параллельными плоскости YZ , сформированной в монокристаллическом образце $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$ методом электрической переполяризации. С помощью металлических электродов к образцу с ППДС вдоль оси Z , имеющему толщину $h = 1$ мм, прикладывалось синусоидальное поле с частотой 1 кГц и амплитудой U_m от 0 до 136 В. Световой пучок с поляризацией вдоль оси Z и длиной волны 655 нм, фокусируемый в середину образца цилиндрической линзой, распространялся в плоскости XY под брэгговским углом к оси Y , с преобразованием в дифрагированную волну на длине взаимодействия $d = 2$ мм. Временная зависимость интенсивности дифрагированного пучка, фиксируемая осциллографом Tektronix TDS 2012C, представляла суперпозицию постоянной составляющей и гармоник с частотами Ω и 2Ω .

Зависимости их амплитуд I_n от U_m , представленные на рис. 1, демонстрируют линейный характер только для первой гармоники ($n = 1$). Отличие постоянной составляющей ($n = 0$) от нуля для $U_m = 0$ и квадратичные зависимости для неё и для второй гармоники ($n = 2$) связаны с вкладом в дифракцию возмущений оптических свойств, вызванных как приложенным полем, так и доменными стенками ППДС, вклад которых в изотропную дифракцию был рассмотрен ранее [2].

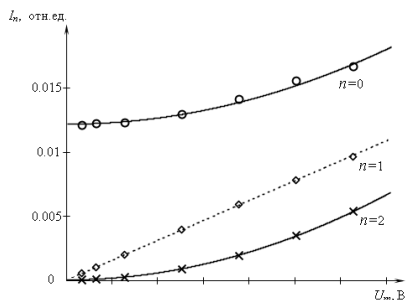


Рис. 1. Зависимости амплитуд гармоник интенсивности в первом дифракционном порядке, нормированных на интенсивность падающего пучка, от амплитуды напряжения, приложенного к кристаллу (точки – эксперимент, линии – расчет)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части Госзадания на 2017-2019 годы (проект №3.8898.2017/8.9) и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Montemezzani G., Zgonik M. // Phys. Rev. 1997. V.E55. P.1035.
2. Shandarov S.M., Mandel A.E., et al. // Ferroelectrics. 2017. V.508. P.49.

Н.Н. СКРЯБИН^{1,2}, М.А. БУХАРИН², С.М. КОСТРИЦКИЙ³,
Ю.Н. КОРКИШКО³, В.А. ФЁДОРОВ³, Д.В. ХУДЯКОВ⁴

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

²*ООО «Оптосистемы», Троицк*

³*НПК Оптилинк, Зеленоград*

⁴*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

КОРРЕКТИРОВКА Y-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ НА ПРОТОНООБМЕННЫХ ВОЛНОВОДАХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЗАПИСИ

Предложен способ корректировки участка Y-разветвителя на протоннообменных волноводах в ниобате лития с избыточным повышением показателя преломления с помощью технологии прямой фемтосекундной записи. Определены оптимальные параметры корректировки и их влияние на рабочие характеристики Y-разветвителей.

N.N. SKRYABIN^{1,2}, M.A. BUKHARIN², S.M. KOSTRITSKIY³,
Yu.N. KORKISHKO³, V.A. FEDOROV³, D.V. KHUDYAKOV⁴

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

²*Optosystems Ltd., Troitsk*

³*RPC Optolink, Zelenograd*

⁴*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

CORRECTION OF Y-BRANCHES ON PROTON-EXCHANGE WAVEGUIDES IN LITHIUM NIOBATE BY FEMTOSECOND WRITING TECHNOLOGY

A method for correcting section of Y-splitter on proton-exchange waveguides in lithium niobate with an excessive refractive index increase by the technology of direct femtosecond writing is proposed. Optimal correction parameters and their influence on the performance of Y-couplers are determined.

В промышленном производстве многофункциональных интегрально-оптический элементов (МИОЭ), использующих Y-разветвители на канальных волноводах, встречается избыточное повышение показателя преломления (п/п) в области Y-разветвления [1]. Было обнаружено, что такие МИОЭ подвергаются колебательному обмену энергией между

выходными ветвями Y-разветвителя при изменении температуры [1]. Скорректировать избыточное повышение п/п в области Y-разветвления можно с помощью технологии прямой фемтосекундной записи, которая позволяет перманентно изменять п/п прозрачных материалов под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов [2].

Эксперименты были проведены вблизи поверхности кристаллов LiNbO_3 x-среза, содержащих Y-образные разветвители на основе протонообменных канальных волноводов шириной 6 мкм. Для фемтосекундной записи был использован лазер HighQ FemtoTRAIN, с длиной волны 1040 нм, длительностью импульса 360 фс, энергией до 350 нДж, частотой 0,1 МГц. Образцы передвигались с помощью трехмерной автоматизированной системы передвижения со скоростью 10 мкм/с. Были записаны корректирующие лазерно-индуцированные структуры, охватывающие глубины от 2 до 6 мкм, шириной 1 мкм и длиной от 50 до 100 мкм при энергиях 40 - 46 нДж. Фотография скорректированных Y-разветвителей приведена на рис. 1.

Скорректированные Y-разветвители были протестированы на температурную стабильность до и после фемтосекундной корректировки. Экспериментально было выявлено, что лазерно-индуцированные структуры длиной 70 мкм и с $\Delta n = -3 \times 10^{-3}$ существенно снижают температурную чувствительность Y-разветвителя так, что коэффициент деления остается неизменным во всем температурном диапазоне (от 0 до +60°C) с точностью до 0,1 %. При этом, фс-коррекция Y-разветвителей, входящих в состав МИОЭ, увеличивает суммарные оптические потери элемента на небольшую величину от 0,1 до 1,3 дБ.

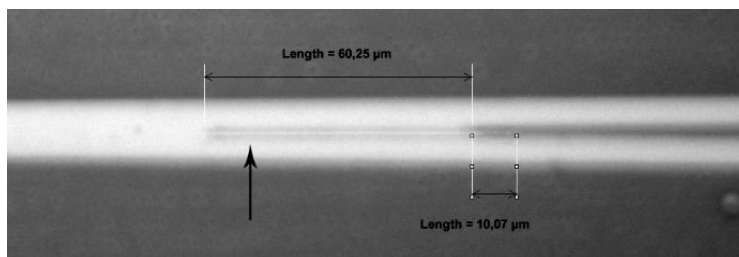


Рис. 1. Микрофотография скорректированного Y-разветвителя

Список литературы

1. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. Optimization of multi-function integrated optics chip fabricated by proton exchange in LiNbO_3 // Proceedings of SPIE. 2013. V.9065.
2. Femtosecond Laser Micromachining / ed. by R. Osellame, R. Ramponi, G. Cerullo. London: Springer-Verlag, 2012.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН¹*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»***ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПЕРИОДЫ СТРУКТУР,
ФОРМИРУЕМЫХ УЛЬТРАКОРОТКОИМПУЛЬСНЫМ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

На ряде экспериментальных примеров показано, что пространственные периоды наноструктур, формируемых в ниобате лития, описываются универсальной поляритонной моделью (УПМ) лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN¹*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instruments Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region*¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)***SPATIAL PERIODS OF STRUCTURES FORMED
BY ULTRASHORT LASER RADIATION IN LITHIUM NIOBATE**

By using set of experimental examples it was shown that orientation and spatial periods of nanostructures produced by USP laser radiation inside lithium niobate are well explained in framework of universal polariton model.

В [1] изучено взаимодействие сканирующего фемтосекундного лазерного излучения ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 250$ фс, $\nu = 10$ Гц, $E_p = 100$ нДж, диаметр зоны воздействия 320 нм, $v = 100$ мкм/с, $N = 10^3$) с объемом ниобата лития, являющегося двулучепреломляющим кристаллом. Наиболее качественные периодические структуры формировались при $\mathbf{E}_t \parallel \mathbf{s}$, где \mathbf{E}_t – тангенциальная проекция вектора напряженности электрического поля лазерного излучения, \mathbf{s} – направление сканирования пучка лазерного излучения. В объеме кристалла наблюдалось образование эквидистантных структур (\mathbf{g}) с ориентацией $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}_t \perp \mathbf{k}$ и периодом $d = \frac{\lambda}{2\eta} = \frac{\lambda}{2n\xi} \approx 167$ нм, обусловленных интерференцией двух поверхностных плазмон поляритонов (ППП) с противоположными направлениями распространения, параллельными \mathbf{E}_t , (рис. 1). Для оценки показателя преломления двулучепреломляющего кристалла

использовалось среднеарифметическое значение
 $n = (n_0 + n_e)/2 = (2,17 + 2,25)/2 = 2,21$.

Аналогичные решетки наблюдались в [2,3] при нормальном падении излучения и плотностях энергии (Q) ниже однократного порога абляции ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 80$ фс, $\nu = 1$ кГц, $Q = 0,54$ Дж/см², $N \sim (10 \div 20)$). Образование структур носило локальный характер, их ориентация $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}_t$ и период $d = \frac{\lambda}{2\eta} = \frac{\lambda}{2n_g} \approx 160$ нм отвечают интерференции, происходящей в объеме кристалла. В [4] при близких величинах Q и скоростей сканирования лазерного излучения обнаружены решетки с периодом $d = \frac{\lambda}{3\eta} \approx 250$ нм, $\eta \approx 1,07$ и ориентацией $\mathbf{g} \perp \mathbf{E}_t$. Эти структуры хорошо описываются порядком Шарковского. Гребни решеток с $d \approx 250$ нм оказываются промодулированными решеткой аномальной ориентации $\mathbf{G} \perp \mathbf{g}$, что свидетельствует об участии в интерференции клиновых ППП [5]. В [6] при высоких $Q \geq 1,8$ Дж/см² образуются структуры с $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}_t$ и $d = \frac{\lambda}{2\eta} \approx 400$ нм и наноконуса. Совокупность экспериментальных данных по наноструктурированию LiNbO₃ УКИ импульсами подтверждает справедливость УПМ для описания его упорядоченного разрушения.

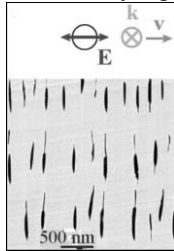


Рис. 1. Вид образованных в кристалле эквидистантных структур

Список литературы

1. Karpinski P., Shvedov V., Krolikowski W., Hnatovsky S. // Optics Express. 2016. V.24. No7. P.7456.
2. Shimusu H., Obara G., Terakawa M., Mazur E., Obara M. // Appl. Phys. Express. 2013. V.6. P.112701.
3. Lu P.Yu., Dai N., Li Y., Wang X., Wang Y., Zheng Q. // J. Opt. A. Pure and Appl. Phys. 2008. V.10. P.035101.
4. Zhang S., Jiang L., Li X., Hu J., Zhao M., Lu Y.F. // Optics Express. 2017. V.25. No10. P.10843.
5. Макин В.С., Пестов Ю.И., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т.120. №4. С.118-123.
6. Lamela J., Lafante G., Han T.P.J., Laque F. // Appl. Surface Science. 2009. V.255. P.3918-3922.

А.И. КОЛЕСНИКОВ, С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ,
Р.М. ГРЕЧИШКИН, Е.Ю. ВОРОНЦОВА, П.В. ИВАНОВА

Тверской государственной университет

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛАХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ КОНОСКОПИИ

Показаны экспериментальные возможности лазерной коноскопии при обнаружении тонких оптических аномалий в одноосных кристаллах, а также при численной оценке вариаций показателей преломления и механических напряжений, вызывающих искажения оптической индикатрисы. Приведены результаты применения метода при исследованиях оптической однородности монокристаллов парателлурита и ниобата лития.

A.I. KOLESNIKOV, S.A. TRETIKOV, I.A. KAPLUNOV,
R.M. GRECHISHKIN, E.Yu. VORONTSOVA, P.V. IVANOVA

Tver State University

EXAMINATION OF OPTICAL ANOMALIES IN UNIAXIAL CRYSTALS BY THE METHOD OF LASER CONOSCOPY

Experimental capabilities of the laser conoscopy method in the examination of fine details of optical anomalies in uniaxial crystals are demonstrated together with numerical estimation of refractive index and mechanical stress variations having an effect on the distortion of optical indicatrix. Examples are given of the usage of the method for the study of optical uniformity of single crystals of paratellurite and lithium niobate.

До недавнего времени метод коноскопии применялся для получения данных только качественного характера. В работе [1] впервые выведено уравнение изохром одноосного кристалла, которое позволяет рассчитать точный вид коноскопической картины. Это положило начало методу численного анализа оптической однородности кристаллов. Целями настоящей работы являлись выявление оптических аномалий в одноосных монокристаллах методом лазерной коноскопии, а также численная оценка факторов, вызывающих аномалии.

Полученная в коническом пучке линейно-поляризованного лазерного излучения картина изохром кристалла, за которым находится анализатор, проецируется на полупрозрачный матовый экран и фотографируется

цифровой камерой. Изображение изохром реального кристалла вводится в компьютерную программу, которая сравнивает его с изображением изохром, рассчитанным теоретически для идеального кристалла. Программа расчетов картин изохром основана на уравнении из [1].

На рис. 1 представлена коноскопическая картина монокристалла ниобата лития в направлении [001]. В отличие от теоретической картины, на которой изохромы должны быть окружностями, на них хорошо видны изломы. Система изломов на изохромах вытянута вдоль направления оптической аномалии – свили. На рис. 2 показано совмещение полученной методом лазерной коноскопии экспериментальной картины с теоретической. Программа вычисляет разности хода между точками соседних изохром и находит вариации показателей преломления в реальном кристалле. Далее рассчитывается механическое напряжение в кристалле в области с аномалией с помощью уравнения, описывающего пьезооптический эффект [2]. Для картины на рис. 2 максимальные вариации показателей преломления составляют 10^{-4} , а механические напряжения сжатия в направлении, ортогональном свили – 10 Мпа.

Таким образом, предложенный и испытанный метод исследования оптических аномалий перспективен в метрологии однородности кристаллов. Информация об аномалиях и их расположении в материале важна при оптимизации условий выращивания монокристаллов.



Рис. 1. Коноскопическая картина монокристалла ниобата лития со свилью в виде серии изломов на изохромах



Рис. 2. Процесс компьютерного совмещения идеальной и реальной коноскопической картины монокристалла парателлуриата с целью расчета вариаций показателей преломления и механических напряжений в областях с оптическими аномалиями

Список литературы

1. Kolesnikov A.I., Grechishkin R.M., Tretiakov S.A., et al. // Materials Science and Engineering. 2013. V.49. P.012037.
2. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука. 1979.

Г.А. АЛОЯН¹, Н.В. КОВАЛЕНКО¹, О.А. РЯБУШКИН^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

²*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Методом пьезорезонансной лазерной калориметрии проведены исследования взаимодействия булы нелинейно-оптического кристалла трибората лития с лазерным излучением. Разработана модель, описывающая процессы теплообмена булы с окружающим воздухом.

G.A. ALOIAN¹, N.V. KOVALENKO¹, O.A. RYABUSHKIN^{1,2}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology State University), Dolgoprudny*
²*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

MEASUREMENT OF LOW OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENTS OF MASSIVE CRYSTALS

Interaction of lithium triborate boules with laser irradiation was investigated using piezoelectric resonance laser calorimetry. Theoretical model that describes processes of heat transfer from boules to air was developed.

Для некоторых задач нелинейной оптики, например, лазерного термоядерного синтеза, необходимо использовать нелинейно-оптические высококачественные кристаллы больших размеров для преобразования частоты лазерного излучения. Одним из основных критериев качества кристаллов является малость величины оптического поглощения. Измерение коэффициентов оптического поглощения кристаллической булы перед последующей обработкой является важной практической задачей.

Нелинейно-оптические кристаллы являются пьезоэлектриками и в них могут бесконтактно возбуждаться пьезоэлектрические резонансы при совпадении частоты внешнего радиочастотного поля с одной из частот собственных акустических мод образца. Собственные частоты кристалла изменяются, при изменении его температуры. Проведя предварительную калибровку резонансных частот при однородном разогреве кристалла, можно при неоднородном разогреве образца лазерным излучением

сопоставить сдвигу резонансной частоты изменение эквивалентной температуры [1].

Однако в объёмных кристаллах, при воздействии лазерного излучения с неравномерным распределением интенсивности в пучке, может возникать существенный температурный градиент и для корректной интерпретации экспериментальных данных необходима дополнительная информация, например, температура поверхности, которую можно измерять термодатчиками на основе пьезоэлектрических кристаллов малых размеров, по сдвигу частот возбуждаемых в них резонансов. Измеряемая таким образом эквивалентная температура отождествляется с температурой поверхности кристалла в области расположения термодатчика.

В работе был измерен коэффициент оптического поглощения булы тривората лития массой 260 г на основе измеренной кинетики эквивалентной температуры при воздействии непрерывного лазерного излучения на длине волны 1064 нм мощностью 11 ватт (рис. 1). Разработана теоретическая модель, позволяющая оценить точность данного метода. На первом шаге решается нестационарное уравнение теплопроводности. Далее, с учётом неоднородного распределения температуры, вычисляются частоты собственных мод в различные моменты времени. Отклонения оптических коэффициентов поглощения, определяемых из аппроксимаций рассчитанных в модели кинетик эквивалентных температур, соответствующих различным модам, от номинального значения не превышает 15% (рис. 2).

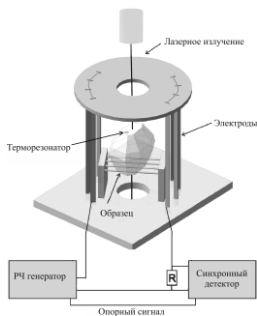


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

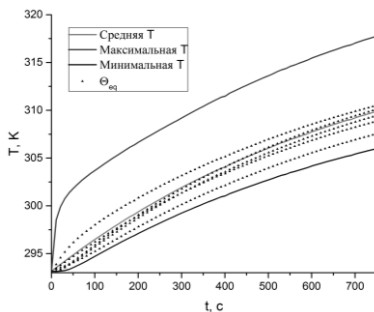


Рис. 2. Расчётные кинетики эквивалентных и термодинамических температур кристалла

Список литературы

1. Ryabushkin O.A., et. al. // Journal of the European Optical Society. 2011. V.6. P.11032.

К.Е. ЖЕВАЙКИН, М.И. ФОКИНА, И.Ю. ДЕНИСЮК
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ
НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ
АМИНОПИРИДИНОВОГО РЯДА**

Приведены результаты экспериментов по исследованию новых нелинейно-оптических органических со-кристаллов 4-нитрофенола с производными аминопиридинового ряда: 2-аминопиридин; 4-аминопиридин; 2,6-диаминопиридин. Представлены значения показателей преломления исследуемых соединений, используя два метода: микроскопический метод и метод Аббе.

K.E. ZHEVAIKIN, M.I. FOKINA, I.Yu. DENISYUK
ITMO University, Saint-Petersburg

**INVESTIGATION OF REFRACTIVE INDEXES
OF ORGANIC NONLINEAR OPTICAL CRYSTALS
BASED ON CONFORMATIONS OF AMINOPYRIDINE**

Results of investigation of new organic nonlinear optical co-crystals 4-nitrophenol with conformations of aminopyridines (2-aminopyridine, 4-aminopyridine, 2,6-diaminopyridine) are presented. We represented values of refractive indexes of organic co-crystals using two methods: microscopy method and Abbe's method.

В настоящее время для создания устройств нелинейной оптики (преобразователей частоты излучения, модуляторов, оптических волноводов, генераторов терагерцового излучения и т.д.) широко применяются неорганические нелинейно-оптические материалы: КТР, KDP, LBO, BBO и др. Однако развитие нелинейно-оптических сред подтолкнуло к созданию большого разнообразия органических нелинейно-оптических материалов, среди которых наиболее выделяются кристаллы MNA, POM и DAST, последний нашел широкое применение в терагерцовой технике [1, 2]. Впрочем, кристаллы DAST обладают рядом недостатков, основными из которых являются нестабильность характеристик и быстрая деградация параметров в результате высокоинтенсивного лазерного излучения и воздействия влаги. Исходя из этого, продолжается поиск новых органических материалов, обладающих нелинейно-оптическими свойствами.

Целью данной работы является экспериментальное исследование показателей преломления новых перспективных органических нелинейно-оптических со-кристаллов 4-нитрофенола с производными аминопиридинами: 2-аминопиридин; 4-аминопиридин; 2,6-диаминопиридин. Ранее были проведены исследования нелинейно-оптических характеристик данного материала, которые показали наличие высоких нелинейно-оптических коэффициентов, а также отсутствие деградации при воздействии мощного лазерного излучения и воздействия влаги [3].

В настоящей работе исследованы показатели преломления следующих со-кристаллов: 2-аминопиридин-4-нитрофенол (2AP4N); 4-аминопиридин-4-нитрофенол (4AP4N); 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол (2,6DAP4N). Изучение данных со-кристаллов проводилось, используя два метода – микроскопический метод и метод Аббе. Полученные значения показателей преломления по микроскопическому методу: $n(2AP4N) = 1.72$; $n(4AP4N) = 1.6$; $n(2,6DAP4N) = 1.59$. Используя метод Аббе: $n(2AP4N) = 1.605$; $n(4AP4N) = 1.589$; $n(2,6DAP4N) = 1.591$. Отклонения от эллиптической формы (рис. 1) объясняются неоднородностью кристалла (наличие эффекта двойникового).

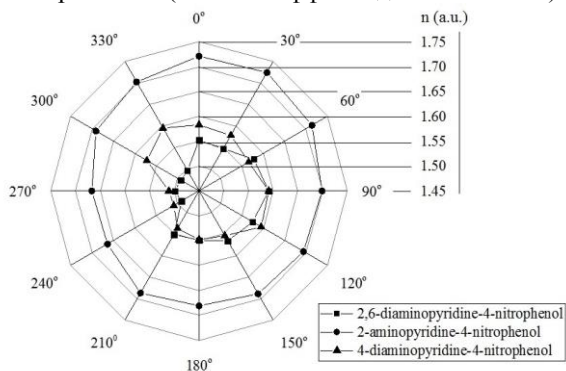


Рис. 1. Круговая диаграмма значений показателей преломления молекулярных со-кристаллов на основе производных аминопиридина с шагом поворота диска 30°

Список литературы

- Vijay R.J., Melikechi N., Kumar T.R., Jesudurai J.G.M., Sagayaraj P. // J. Crystal Growth. 2010. V.312. P.420.
- Аснис Л.Н. и др. Особенности оптических и нелинейно-оптических характеристик многослойных кристаллов DAST // Оптический журнал. 2011. №11. С.96-100.
- Pavlovets I.M., Draguta S., Fokina M.I., Timofeeva T.V., Denisuk I.Yu. // Opt. Commun. 2016. P.64-68.

А.О. ЗЛОБИН, С.М. ШАНДАРОВ, Н.И. БУРИМОВ,
А.А. ШМИДТ, В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ¹, А.В. МАКАРЕВИЧ¹

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,
Беларусь*

ПОПУТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН С ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В КРИСТАЛЛЕ BSO СРЕЗА (110)

Экспериментально исследована анизотропия эффективности попутного взаимодействия световых волн с циркулярной поляризацией в кристалле силиката висмута среза (110) с использованием эффекта фазовой демодуляции.

A.O. ZLOBIN, S.M. SHANDAROV, N.I. BURIMOV,
A.A. SHMIDT, V.V. SHEPELEVICH¹, A.V. MAKAREVICH¹

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
¹I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Belarus*

CO-DIRECTIONAL INTERACTION OF CIRCULARLY- POLARIZED LIGHT WAVES IN THE (110)-CUT BSO CRYSTAL

We experimentally investigate anisotropy of the efficiency of co-directional interaction of light waves with circular polarization in the (110)-cut bismuth silicon oxide crystal by using the phase-demodulation effect.

Естественная оптическая активность кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) класса силленитов приводит к немонотонной зависимости коэффициента двухпучковой связи Γ от длины взаимодействия линейно поляризованных волн на пропускающих голограммах диффузионного типа [1], ограничивающей возможности применения таких фоторефрактивных сред в устройствах динамической голографии и адаптивной интерферометрии.

В настоящей работе экспериментально исследована анизотропия эффективности попутного взаимодействия в кристалле BSO для циркулярно-поляризованных волн, когда Γ остается постоянным по всей толщине d фоторефрактивного образца. В экспериментах использовался образец BSO среза (110) с толщиной $d = 2.8$ мм, помещенный в оправу, позволяющую задавать ориентационный угол θ между вектором \mathbf{K} картины интерференции взаимодействующих световых пучков (длина волны 633 нм) и кристаллографическим направлением [001]. Световые

пучки с одинаковыми циркулярными поляризациями, задаваемые составными фазовыми пластинками [2], пересекались в кристалле под углом $\alpha = 40^\circ$, биссектрисой которого являлось направление [110]. Использование фазовой модуляции входного сигнального пучка на частоте $f = 1650$ Гц, регистрации сигнала демодуляции после взаимодействия и описанной в работе [3] методики его обработки позволили определить ориентационную зависимость относительной амплитуды для присутствующей в нем второй гармоники $M^{(2)}(\theta)$ (рис. 1). Из него следует, что в диапазоне углов $-30^\circ < \theta < +30^\circ$ наблюдается заметное отличие в фоторефрактивном отклике для волн с правой и левой поляризацией, которое не описывается расчетом (сплошная кривая на рис. 1) с использованием известных моделей взаимодействия [1, 3]. Причина данного отличия может быть связана с эффектом электрогирации [4].

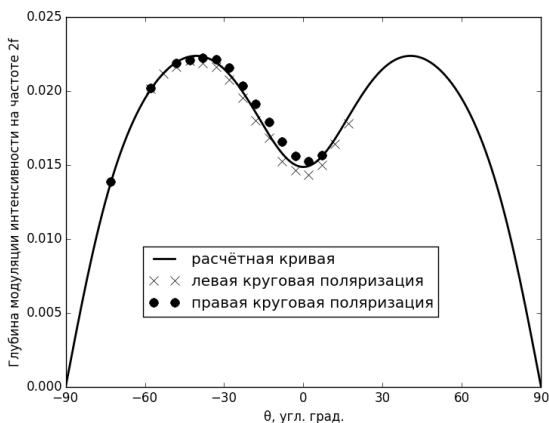


Рис. 1. Ориентационная зависимость для амплитуды второй гармоники

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017-2019 г.г. (проект №3.8898.2017/8.9) и РФФИ (грант № 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Шепелевич В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах. Минск, 2012.
2. Гольцер И.В., Даршт М.Я. и др. // Квантовая электроника. 1995. Т.22 (2). С.201.
3. Шандаров С.М., Буримов Н.И. и др. // В сб.: Голография. Наука и практика: тезисы докладов XIII международной конференции. 2016. С.140.
4. Влох О.Г., Царик А.В. // Укр. физ. журн. 1977. Т.22 (6). С.1027.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, А.И. ИВАНОВА,
И.А. КАПЛУНОВ, Е.Ю. ЛАВРОВА
Тверской государственной университет

**МЕТОД ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ
УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ
ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ
ГЕРМАНИЯ**

Приведены результаты тепловизионного контроля процесса нагрева образцов монокристаллического германия с различной концентрацией легирующей примеси. Данные получены в виде температурных профилей и зависимостей температуры от времени. Сделаны выводы о чувствительности метода тепловизионного контроля для определения удельного электросопротивления и анализа однородности данного параметра.

S.A. TRETIKOV, A.I. IVANOVA,
I.A. KAPLUNOV, E.Yu. LAVROVA
Tver state university

**METHOD OF THERMAL IMAGING CONTROL
FOR DETERMINATION OF ELECTRICAL RESISTIVITY
AND CONCENTRATION OF DOPING IMPURITY
IN SINGLE CRYSTALS OF GERMANIUM**

The results of thermal imaging control of the heating of single crystal germanium samples with different dopant concentrations are presented. Data are obtained in the form of temperature profiles and temperature dependences versus time. Conclusions are made about the sensitivity of the thermal imaging method for determining the resistivity and analyzing the homogeneity of this parameter.

Монокристаллы германия – технически ценный материал для изготовления приборов ИК-оптики, полупроводниковой техники, детекторных устройств. Чистый германий – типичный полупроводник, обладает при комнатной температуре относительно невысоким (~47 Ом·см) удельным электросопротивлением, на которое существенно влияет наличие и концентрация электрически активных примесей. Для оптического применения наиболее эффективно используют (максимальное пропускание ИК-излучения в области 2,3-14,0 мкм) монокристаллы германия *n*-типа с удельным сопротивлением 2-20 Ом·см [1, 2].

На практике для определения удельного электросопротивления наиболее часто применяют четырехзондовый метод, который по сути своей является контактным и точечным. Известно, что теплопроводность легированного полупроводника зависит от его электропроводности [3], что позволяет использовать тепловые методы, в частности тепловизионный контроль, для оценки удельного электросопротивления. Преимуществами тепловизионного метода являются его бесконтактность и возможность получения картины распределения примеси по всему объему кристалла.

Цель работы заключалась в установлении возможности определения удельного сопротивления, концентрации и распределения примеси путем тепловизионного контроля образцов германия в процессе их нагрева.

В экспериментах использовали монокристаллы германия n-типа, легированные сурьмой с различной концентрации ($2 \cdot 10^{13} \dots 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

В процессе нагрева образцов, с помощью тепловизора FLIR T250, фиксировали динамику температур (рис. 1 и 2). Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о разрешающей способности тепловизионного контроля (для используемой тепловизионной камеры) удельного сопротивления $\sim 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

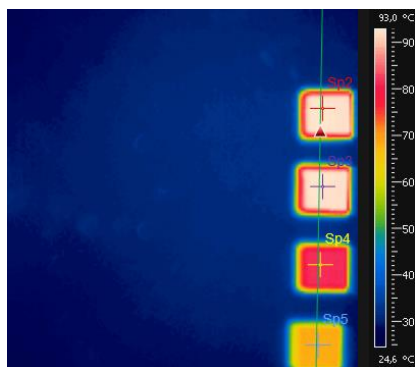


Рис. 1. Тепловизионное изображение нагретых образцов германия с разным электросопротивлением

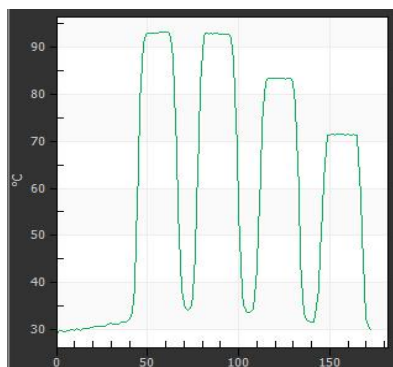


Рис. 2. Температурный профиль образцов в момент максимального нагрева

Список литературы

1. Подкопаев О.И., Шиманский А.Ф. и др. // Физика и техника полупроводников, 2016, Т.50. Вып.10. С.1309.
2. Каплунов И.А., Смирнов Ю.М. и др. // Перспективные материалы. 2003. № 4. С.35.
3. Стилбанс Л.С. Физика полупроводников. М.: Советское радио, 1967.

М.О. ЖУКОВА, Я.В. ГРАЧЁВ, В.П. ЧЕГНОВ¹,
О.И. ЧЕГНОВА¹, В.Г. БЕСПАЛОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

*¹Научно-исследовательский институт материаловедения им. А.Ю. Малинина,
Зеленоград*

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ В КРИСТАЛЛАХ ZnSe НА ПРОПУСКАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ДИНАМИКУ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ

Приведены результаты экспериментального исследования влияния примесей железа в полупроводниковых кристаллах ZnSe на пропускание в терагерцовом диапазоне частот методом терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени и на динамику фотоэлектронов методом спектроскопии накачка-зондирование. Рассматривается возможность увеличения эффективности электрооптического преобразования.

M.O. ZHUKOVA, Ya.V. GRACHEV, V.P. CHEGNOV¹,
O.I. CHEGNOVA¹, V.G. BESPALOV

ITMO University, Saint-Petersburg

¹Research Institute of Materials Science and Technology, Zelenograd

INFLUENCE OF IMPURITIES IN ZnSe CRYSTALS ON TERAHERZ TRANSMISSION AND PHOTOELECTRONS DYNAMICS

The experimental results of influence of ferrum impurities in ZnSe semiconductor crystals on transmission in the terahertz range studying by the method of terahertz time-domain spectroscopy were presented, as well as photoelectrons dynamics measured by pump-probe spectroscopy method. The possibility of increasing the efficiency of electro-optical conversion was discussed.

Освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот оптического излучения обеспечивает широкие возможности применений в беспроводных телекоммуникациях, системах обеспечения безопасности, дефектоскопии, биологии, медицине, а также для исследования быстротекающих процессов [1]. Ранее авторами работы рассматривалась возможность увеличения эффективности работы ТГц систем путем увеличения интенсивности излучения и оценки возникающих ограничений [2, 3].

В данной работе исследуется возможность увеличения эффективности электрооптического преобразования путем увеличения концентрации носителей в кристаллах ТГц диапазона. Рассматриваются тонкие кристаллические пластины селенида цинка (ZnSe) [4] толщиной порядка 610 мкм как нелегированные, так и с примесями железа (ZnSe:Fe) с концентрацией 0,23 %.

На рис. 1 приведены результаты пропускания двух вышеописанных образцов в терагерцовом диапазоне. Эксперименты проводились на ТГц спектрометре с разрешением во времени. В качестве генератора ТГц излучения использовался кристалл InAs, помещенный в поле постоянного магнита индукцией 2,4 Тл, который накачивался фемтосекундным лазером с длиной волны 1055 нм, длительностью импульса 100 фс и выходной мощностью 3,8 Вт. Из рис. 1 видно, что в частотном диапазоне 0,3-0,5 ТГц пропускание ZnSe:Fe увеличивается. Подобные явления в других кристаллах наблюдались, например в [5]. При легировании ZnSe:Fe до определённой концентрации поляризуемость молекулы увеличивается, что увеличивает и электрооптический коэффициент.

Для понимания и сравнения динамики фотоэлектронов было также проведено исследование образцов методом спектроскопии накачка-зондирование. Наличие примесей в образце делает среду более прозрачной в ТГц диапазоне, что может увеличить эффективность преобразования, управления и регистрации ТГц излучения.

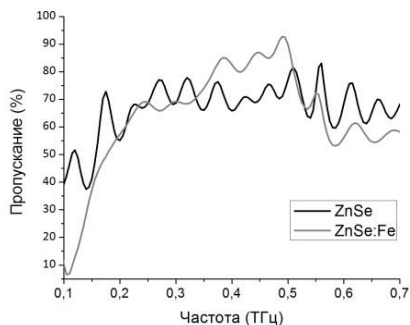


Рис. 1. Пропускание ZnSe и ZnSe:Fe в ТГц диапазоне частот

Список литературы

1. Dhillon S.S., et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. V.50 (4). P.043001.
2. Osipova M.O., Makarov E.A., Bepalov V.G. // Laser Optics (LO), IEEE. 2016. P.R8-45.
3. Perlin E. Yu., Bondarev M.A., Zhukova M.O. // Optics and spectr. 2017. V.123 (4). P.578.
4. Avetissov I.C., et al. // CrystEngComm. 2015. V.17 (3). P.561.
5. Red'kin R.A., et al. // Proc. of Control and Communications (SIBCON). P.1.

А.Д. МОЛЧАНОВА, К.Н. БОЛДЫРЕВ, М.Н. ПОПОВА,
М.А. ПРОСНИКОВ¹, Р.М. ДУБРОВИН¹, Р.В. ПИСАРЕВ¹

Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

ДИНАМИКА РЕШЁТКИ БОРАТА МЕДИ $\text{Cu}_3(\text{BO}_3)_2$ СО СЛОЖНОЙ СЛОИСТОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Приведены результаты экспериментального исследования динамики решётки бората меди $\text{Cu}_3(\text{BO}_3)_2$ методами ИК и КРС спектроскопии. Определены параметры всех наблюдаемых ИК и КРС активных фононных мод. Обсуждаются возможные причины наличия большого количества фононов в низкочастотной ($< 100 \text{ см}^{-1}$) области спектров, нехарактерного для других медных боратов.

A.D. MOLCHANOVA, K.N. BOLDYREV, M.N. POPOVA,
M.A. PROSNIKOV¹, R.M. DUBROVIN¹, R.V. PISAREV¹

Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk

¹*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

LATTICE DYNAMICS OF STRUCTURALLY COMPLEX LAYERED COPPER BORATE $\text{Cu}_3(\text{BO}_3)_2$

Presents the results of the experimental study of lattice dynamics in copper borate $\text{Cu}_3(\text{BO}_3)_2$ by IR and Raman spectroscopy methods. The parameters of all observed IR and Raman active phonon modes have been determined. Possible reasons for the presence of a large number of phonons in the low-frequency ($< 100 \text{ cm}^{-1}$) region of the spectra, uncharacteristic for other copper borates, were discussed.

Борат меди $\text{Cu}_3(\text{BO}_3)_2$ обладает сложной кристаллической и магнитной структурами. Измерения магнитной восприимчивости [1, 2], удельной теплоемкости [2, 3] и неупругого рассеяния нейтронов [2] выявило образование щели $\sim 3,4$ мэВ в спектрах магнитных возбуждений ниже температуры магнитного фазового перехода при $T_N = 10$ К, что указывает на синглетное основное состояние. Однако, измерения магнитной восприимчивости вдоль направления, перпендикулярного к слоям [3], наблюдение спин-флоп-перехода при $H_c = 9,5$ Тл [4], и ЯМР-измерения на ядрах ^{11}B [4] указывают на трёхмерное антиферромагнитное упорядочение.

Интересны также фоновые характеристики $\text{Cu}_3(\text{VO}_3)_2$. Низкосимметричная кристаллическая структура (пространственная группа $P\bar{1}$) и большое количество атомов ($N = 110$) в примитивной ячейке приводит к сложному виду спектров колебательных мод, что и является предметом исследования данной работы.

Нами были зарегистрированы спектры ИК пропускания, нарушенного полного внутреннего отражения и комбинационного рассеяния света, что позволило составить наиболее полное представление о динамике решётки $\text{Cu}_3(\text{VO}_3)_2$. На рис. 1 приведены карты интенсивностей спектров пропускания $\text{Cu}_3(\text{VO}_3)_2$ для двух диапазонов частот. Отличительной особенностью фоновой структуры $\text{Cu}_3(\text{VO}_3)_2$ является наличие большого числа низкочастотных мод, многие из которых обладают заметной температурной зависимостью. Наибольший интерес представляют моды $\nu_1 = 30.2 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_2 = 32.6 \text{ см}^{-1}$, низкие частоты которых нехарактерны для соединений боратов меди. Природу мод ν_1 и ν_2 , вероятно, можно связать с наличием суперструктуры вдоль одной из кристаллографических осей, либо с формированием Ян-Теллеровских полярных центров.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов МК-3577.2017.2 и гранта РНФ 16-12-10456.

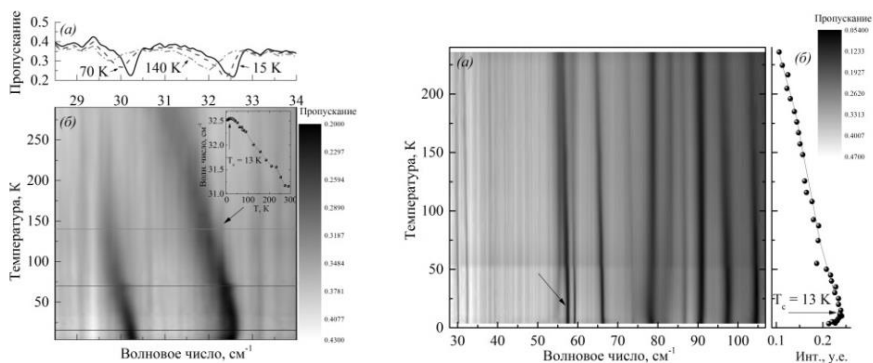


Рис. 1. Карты интенсивностей спектров пропускания $\text{Cu}_3(\text{VO}_3)_2$ в диапазонах частот 29–34 см^{-1} (слева) и 30 – 110 см^{-1} (справа)

Список литературы

1. Petrakovskii G.A., Sablina K.A., et al. // Phys. Solid State. 1999. V.41. P.610.
2. Petrakovskii G.A., Bezmaternykh L.N., et al. // Phys. Solid State. 2007. V.49. P.1315.
3. Kudo K., Noji T., Koike Y. // J. Phys. Soc. Jpn. 2001. V.70. P.935.
4. Sakurai H., Tsuboi N., et al. // Phys. Rev. B. 2002. V.66. P.024428.

А.Д. НЕКРАСОВ, Б.И. ШАПИРО, В.С. КРИВОБОК¹,
В.С. ЛЕБЕДЕВ¹

*Московский технологический университет
(институт тонких химических технологий)*

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСНЫЕ J-АГРЕГАТЫ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ФОТОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Разработан процесс управляемого синтеза нано- и микрокристаллов металлокомплексов J-агрегатов анионных полиметиновых красителей. Установлено, что наряду с максимумом резонансной экситонной люминесценции с малым стоксовым сдвигом, наблюдается второй максимум люминесценции со стоксовым сдвигом порядка 100 нм и более длительным временем затухания люминесценции.

A.D. NEKRASOV, B.I. SHAPIRO, V.S. KRIVOBOK¹,
V.S. LEBEDEV¹

Moscow Technological University (Institution of Fine Chemical Technology)

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

LUMINESCENT METALLOCOMPLEXES J-AGGREGATES OF POLYMETHINE DYES FOR PHOTONICS AND OPTOELECTRONICS

The process of controlled synthesis of nano- and microcrystals of metal complexes of J-aggregates of anionic polymethine dyes is developed. It is established that along with the resonant maximum of exciton luminescence with a small Stokes shift, a second luminescence maximum with a Stokes shift of about 100 nm and a longer luminescence decay time is observed.

Одними из перспективных направлений в развитии электроники и фотоники, несомненно, являются «органическая электроника и фотоника». В настоящее время важное значение приобретают высокоупорядоченные анизотропные молекулярные наноагрегаты и микрокристаллы из полиметиновых красителей. Интенсивное поглощение света и высокий квантовый выход генерации экситонов Френкеля в J-агрегатах красителей при действии света делает их перспективными в

качестве фотоприемников и источников излучения, химических сенсоров и фотовольтаических преобразователей [1, 2]. Существенное влияние на агрегацию анионных красителей оказывают катионы металлов [2].

В работе разработана методика управляемой кристаллизации нано- и микрокристаллов комплексов J-агрегатов анионных тианометинцианиновых красителей с двух- и трехзарядными катионами металлов (Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+}). Измерения спектров люминесценции J-кристаллов на примере магниевых комплексов анионных тианометинцианинов показали, что наблюдается два максимума люминесценции - наряду полосой резонансной люминесценции с максимумом при 480-500 нм с малым стоковым сдвигом (15 нм) присутствует вторая длинноволновая полоса люминесценции в области 580-625 нм со стоковым сдвигом 100-120 нм. При этом соотношение интенсивностей этих максимумов люминесценции зависит от структуры красителя, катиона металла и условий синтеза кристаллов (температуры, скорости перемешивания раствора). Заметные величины стоковых сдвигов люминесценции вероятно связаны с захватом экситонов с последующей их излучательной рекомбинацией на дефектах структуры J-кристаллов, играющих роль экситонных ловушек [3-5], что подтверждается данными о временах излучательной релаксации резонансной и длинноволновой люминесценции Mg-комплексов тианометинцианинов, составляющими порядка 0,1 и 10 нс, соответственно. Установлено, что в процессе перекристаллизации J-агрегатов магниевых комплексов происходит уменьшение интенсивности люминесценции длинноволновой полосы при одновременном формировании узкой полосы резонансной люминесценции. Вероятно, это связано с перекристаллизацией дефектных J-агрегатов в более упорядоченные J-агрегаты, содержащие меньшее количество дефектов. Высказано предположение, что это свидетельствует о преимущественном вкладе в длинноволновую люминесценцию поверхностных дефектов. Сделан вывод, что J-агрегаты металлокомплексов полиметиновых красителей представляют интерес в качестве люминесцирующих материалов для нанофотоники.

Список литературы

1. Шапиро Б.И. // Успехи химии. 2006. Т.75. №5. С.484.
2. Шапиро Б.И. // Российские нанотехнологии. 2008. Т.3. №3-4. С.72.
3. Заболотский А.А. // ЖЭТФ. 2008. Т.133. №2. С. 466-476.
4. Sorokin A.V., et al. // J. Phys. Chem. C. 2015. V.119. №49. P. 27865-27873.
5. Yefimova S.L., et al. // Low Temp. Phys. 2011. V.37. №2. P.157-162.

С.М. АРАКЕЛЯН, А.О. КУЧЕРИК, С.В. КУТРОВСКАЯ,
А.В. ОСИПОВ, К.С. ХОРЬКОВ, А.В. ИСТРАТОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

**ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СОСТОЯНИЯ ТОНКИХ
НАНОКЛАСТЕРНЫХ ПЛЕНОК – ВЕРИФИКАЦИЯ
В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИКАХ**

Лазерными методами созданы различные нанокластерные тонкие пленки на твердых подложках, для которых возможность управления их функциональными (электрофизическими и оптическими) свойствами реализуется из-за индуцированной заданной топологии и выбранного элементного состава осаждаемых материалов. Обсуждается возможность высокотемпературной сверхпроводимости в подобных нанокластерных структурах.

S.M. ARAKELIAN, A.O. KUCHERIK, S.V. KUTROVSKAYA,
A.V. OSIPOV, K.A. KHORKOV, A.V. ISTRATOV

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

**LASER-INDUCED TOPOLOGICAL SUPERCONDUCTING
STATES OF THIN NANOCUSTER FILMS – VERIFICATION
IN ELECTROPHYSICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS**

Laser methods have been used to create the various nanocluster thin films on solid substrates for which the possibility of controlling their functional (electrophysical and optical) properties is realized due to the induced necessary topology and the selected elemental composition of the deposited materials. The possibility of high-temperature superconductivity in such nanocluster structures is discussed.

В наших экспериментах зафиксированы различные физические/электрофизические свойства нанокластерных систем, которые были очень чувствительны к форме, размеру и расстоянию между их составными элементами (см. [1]). Возникающие квантовые коррелированные состояния в таких гранулированных нанокластерных полупроводниковых/металлических структурах приводят к прыжковой/туннельной электропроводимости (ср. с [2]) и управляемому изменению резонансных спектроскопических параметров (ср. с [3-5]).

Получено сильное (на 4 порядка величин) уменьшение электросопротивления тонкой пленки Au (с 10^{11} до 10^7 Ом), которое зависит от топологии нанесенной на подложку кластерной структуры. Количественной характеристикой этих топологических особенностей является определяемая нами фрактальная размерность [3]. В рамках перколяционной модели (с потенциальными ямами) получено хорошее совпадение измеряемых и расчетных значений электросопротивления.

Влияние температуры на процесс распространения носителей заряда изучалось нами в температурном интервале 20-100°C для двух образцов биметаллических (Au+Ag) пленок с одинаковой средней толщиной 50 нм, но с различной скоростью (0.6 и 1.5 мм/с) лазерного осаждения вещества на подложку из предварительно полученного коллоида. На начальном этапе нагрева преобладали туннельные переходы электронов между гранулами в пленке Au+Ag. Начиная с 60°C, наблюдалось скачкообразное снижение сопротивления при повышении температуры, что связано с эффектом теплоактивации электронов. Измеренная энергия активации определялась значением ~ 1 эВ и была заметно меньше работы выхода электрона в массивном образце (~ 4 эВ) [4]. Это определяется значением локального поля, действующего на зарядовые носители в потенциальной яме. Подобный аналог эффекта SERS в спектроскопии также наблюдался нами [5].

Обсуждается возможность высокотемпературной сверхпроводимости в подобных нанокластерных структурах на различных (нефоновных) механизмах спаривания электронов, верификация которой проявляется в энергетических спектрах, зависит от синтезируемой конкретной структуры в рамках оболочечной модели кластеров и определяется плотностью состояний электронов вблизи уровня Ферми [2].

Достижения в этой области позволяют говорить о возможных применениях данных явлений в гибридных устройствах фемтонанопотоники (оптика+электрофизика) нового поколения.

Список литературы

1. Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. и др. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов/ под общ. ред. С.М. Аракеяна // М.: Логос, 2015.
2. Кресин В.З., Овчинников Ю.Н. // УФН. 2008. Т.178. №5. Р.449-458.
3. Антипов А.А., Аракелян С.М., Кутровская С.В. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т.80. №7. С.818-827.
4. Kutrovskaya S., Arakelian S., Kucherik A., et al. // Sci. Rep. 2017. V.7. P.10284.
5. Kavokin A., Kutrovskaya S., Kucherik A., et al. // Superlattices and Microstructures. 2017. V.109. P.1-5.

Ф.И. ЗОЛОТОВ^{1,2}, А.В. ДИВОЧИЙ², Ю.Б. ВАХТОМИН^{2,3},
И.В. ПЕНТИН², П.В. МОРОЗОВ², В.А. СЕЛЕЗНЕВ^{2,3},
К.В. СМИРНОВ^{1,2,3}

¹*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

²*ООО «СКОНТЕЛ», Москва*

³*Московский педагогический государственный университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НИТРИДА ВАНАДИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЧЕТЧИКОВ ОДИНОЧНЫХ ИК-ФОТОНОВ

Получены первые результаты по применению сверхпроводниковых пленок нитрида ванадия (VN) для детекторов одиночных фотонов ИК-диапазона. Изучение сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD), изготовленных на основе ультратонких (~5 нм) пленок VN, показало возможность создания устройств с близкой к насыщению зависимостью квантовой эффективности от тока смещения детекторов в телекоммуникационном диапазоне длин волн. Также нами были исследованы кинетическая индуктивность изготовленных структур с различной длиной сверхпроводниковой полоски и времена релаксации электронов в тонких сверхпроводниковых пленках VN.

P.I. ZOLOTOV^{1,2}, A.V. DIVOCHIY², Yu.B. VAKHTOMIN^{2,3},
I.V. PENTIN², P.V. MOROZOV², V.A. SELEZNEV^{2,3},
K.V. SMIRNOV^{1,2,3}

¹*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

²*LLC «SCONTEL», Moscow*

³*Moscow State University of Education*

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING SINGLE-PHOTON DETECTORS BASED ON THIN VANADIUM NITRIDE FILMS

We present first results on development of superconducting single-photon detectors (SSPD) based on thin (~5 nm) vanadium nitride (VN) films. We show the possibility of creating such VN SSPD devices with close to saturation quantum efficiency dependence on bias current at telecom range. The research also presents kinetic inductance and electron relaxation time measurements of thin VN films.

За последние годы, ключевые характеристики сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD) были существенно улучшены.

Рекордные значения квантовой эффективности ($> 90\%$), временного разрешения (~ 18 пс) и скорости счета (~ 10 МГц) помогли этому типу однофотонных детекторов получить широкое распространение и применение в таких областях как исследование однофотонных источников, спектроскопия одиночных молекул, тестирование интегральных микросхем и др. [1].

Одним из главных направлений по дальнейшему совершенствованию характеристик SSPD является использование различных сверхпроводниковых материалов. В настоящее время, наиболее распространенным с точки зрения изготовления SSPD материалом является нитрид ниобия. Однако, как было показано в работах [2, 3], применение аморфных пленок (WSi, MoSi), имеющих более низкие температуры перехода к сверхпроводящему состоянию (T_c), позволяет значительно улучшить внутреннюю квантовую эффективность устройств. Вместе с тем, при использовании таких материалов, временное разрешение SSPD устройства ухудшается, в следствие чего, его спектр применений в существенной мере сужается.

В данной работе мы представляем результаты создания SSPD устройств из тонких пленок VN, имеющих промежуточное значение критической температуры по сравнению с пленками NbN и WSi. Изучение кинетической индуктивности изготовленных структур выявило различие данного параметра при сравнении VN и NbN SSPD (рис. 1 и 2).

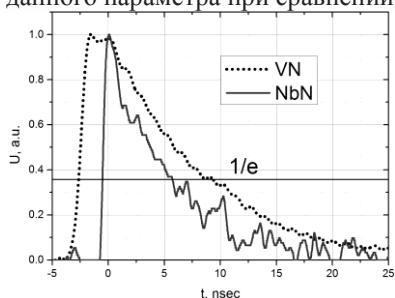


Рис. 1. Сравнительное изображение импульсов отклика NbN и VN SSPD с равными длинами сверхпроводящей полоски

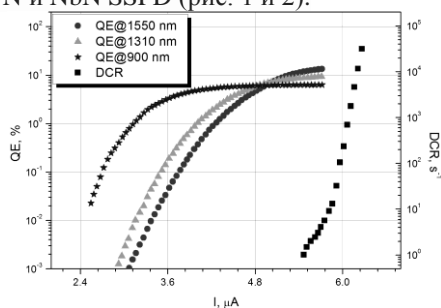


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности (QE) VN SSPD от тока смещения на длинах волн 900, 1310 и 1550 нм

Список литературы

1. Yamashita T., et al. // IEICE Transactions on Electronics. 2017. 100.3. P.274-282.
2. Marsili F., et al. // Nature Photonics. 2013. 7.3. P.210-214.
3. Seleznev V.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737.

Д.А. ВОЛГИНА, Е.А. СТЕПАНИДЕНКО, Т.К. КОРМИЛИНА,
С.А. ЧЕРЕВКОВ, А. ДУБОВИК, М.А. БАРАНОВ,
А.В. ФЕДОРОВ, Е.В. УШАКОВА, А.В. БАРАНОВ, К. ТАКАЙ¹,
П.С. САМОХВАЛОВ², И.Р. НАБИЕВ^{2,3}

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Университет Хосей, Токио, Япония*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

³*Университет города Реймса, Шампань-Арденны, Франция*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЛОИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ «АЛЛОИДНАЯ КВАНТОВАЯ ТОЧКА – НАНОЧАСТИЦА ЗОЛОТА»

В работе исследовались особенности комплексов, состоящих из наночастиц золота и квантовых точек градиентного состава, сформированные в коллоидных растворах. Показано влияние способа приготовления комплексов на морфологию и оптические свойства полученных образцов.

D.A. VOLGINA, E.A. STEPANIDENKO, T.K. KORMILINA,
S.A. CHEREVKOV, A. DUBAVIK, M.A. BARANOV,
A.V. FEDOROV, E.V. USHAKOVA, A.V. BARANOV, K. TAKAI¹,
P.S. SAMOKHVALOV², I.R. NABIEV^{2,3}

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Hosei University, Tokyo, Japan*

²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

³*University of Reims, Champagne-Ardenne, France*

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES OF ALLOYED QUANTUM DOT – GOLD NANOPARTICLE COLLOIDAL COMPLEXES

In this work, we have investigated the features of complexes consisting of gold nanoparticles and alloyed quantum dots of gradient composition, formed in colloidal solutions. We showed the influence the complexes' preparation method has on the morphology and optical properties of the obtained samples.

Формирование гибридных комплексов из различных наноматериалов и изучение их синергетических свойств являются важными аспектами развития нанооптики и фотоники. Особый интерес представляют

комплексы на основе металлических наночастиц (НЧ) и полупроводниковых квантовых точек (КТ) [1-3]. В таком сочетании уникальные оптические свойства КТ, такие как высокий квантовый выход фотолюминесценции и большие значения коэффициентов экстинкции в широком спектральном диапазоне, усиливаются за счет локальных полей вблизи металлических НЧ [4].

В данной работе были использованы коллоидные КТ градиентного состава CdZnSe/ZnS [5] и НЧ золота [6], которые были связаны молекулами-линкерами с различной длиной цепочки. Оптические свойства и морфология образцов были исследованы с использованием спектрофотометра UV3600 (Shimadzu), спектрофлуорометра Cary Eclipse (Varian) и конфокального микроскопа LSM-710 (Carl Zeiss), микроскопа MicroTime 100 (PicoQuant) и электронного микроскопа Merlin (Carl Zeiss).

В первую очередь нами было исследовано влияние относительных концентраций КТ и НЧ в органических растворителях на оптический отклик образцов. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что в присутствии Au НЧ происходит тушение люминесценции КТ. Это, в основном, связано с нежелательным процессом резонансного переноса энергии от КТ до Au НЧ в смеси, а также дополнительного поглощения Au НЧ в смеси. Следовательно, чтобы избежать нежелательного изменения люминесцентных свойств КТ, необходимо обеспечить контроль расстояния между частицами в комплексах.

За счет использования лигандов разных типов в качестве молекул-линкеров, были получены комплексы с контролируемым расстоянием между частицами. Были исследованы морфология и оптические свойства комплексов в зависимости от типа и длины лигандной цепи, типов растворителей и способа получения комплексов. Результаты исследования морфологии и оптических свойств комплексов КТ-НЧ показывают, что параметры этих систем, в основном, зависят от типа лиганда и протокола приготовления образцов. В результате работы получены комплексы связанных КТ-НЧ в коллоидном растворе с сохраненными оптическими свойствами КТ.

Список литературы

1. Ridolfo A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V.105. №26. P.2636012.
2. Paramanik B., et al. // J. Mater. Chem. C. 2016. V.4. №3. P.486-4964.
3. Cox J.D., et al. // Adv. Opt. Mater. 2013. V.1. №. 6. P. 460-467.
4. Kress S.J.P., et al. // Nano letters. 2014. V.14. №10. P.5827-5833.
5. Bae W.K., et al. // Nano Lett. 2010. V.10. №7. P.2368-2373.
6. Dubavik A., et al. // Langmuir. 2011. V.27. №16. P.10224-10227.

К.С. ЛЕВЧЕНКО, К.А. ЧУДОВ, Н.О. ПОРОШИН,
Е.В. ЗИНОВЬЕВ, П.А. ЧИЧЕВА, Е.А. ШОХИНА,
П.С. ШМЕЛИН, Е.П. ГРЕБЕННИКОВ
АО «ЦНИТИ «Техномаш», Москва

**ОРГАНИЧЕСКИЕ ХРОМОФОРЫ
С НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ**

В настоящей работе рассмотрен подход к синтезу новых хромофоров классов 3-цианохромонов и 3-цианокумаринов, исследованы спектральные свойства полученных соединений, произведена сравнительная оценка их применения в составе электрооптических модуляторов.

K.S. LEVCHENKO, K.A. CHUDOV, N.O. POROSHIN,
E.V. ZINOVIEV, P.A. CHICHEVA, E.A. SHONINA,
P.S. SHMELIN, E.P. GREBENNIKOV
JSC «TECHNOMASH», Moscow

**ORGANIC CHROMOPHORES WITH NONLINEAR OPTICAL
PROPERTIES FOR ELECTROOPTICAL MODULATORS**

In the present work an approach to the synthesis of new chromophores of the 3-cyanochromone and 3-cyanocoumarin classes was considered. The spectral properties of synthesized compounds were investigated; their application for the electrooptical modulators was described.

Постоянно растущие потребности в скорости в отдельно взятом канале передачи приводят к взрывному, экспоненциальному росту трафика в сетях абонентского доступа, что ведет к созданию сетей пятого поколения (5G). В таких сетях огромную роль играют системы модуляции/демодуляции потоков со скоростями данных выше 10 Гбит/с (до 100 ГГц). В настоящее время большинство модуляторов работают на основе ниобата лития, позволяющего модулировать сигнал с частотой до 20 ГГц, что является недостаточным. В качестве альтернативы могут использоваться органические материалы с квадратичным откликом на приложенное электрическое поле высокой интенсивности. Среди преимуществ таких материалов стоит отметить большие значения нелинейной электрической восприимчивости, быстрый отклик, химическое разнообразие – возможность вводить в состав материала

различные функциональные группы и этим варьировать физико-химическими свойствами, простоту получения и обработки [1, 2].

В результате работы были синтезированы новые хромофоры классов 3-цианохромонов и 3-цианокумаринов. На рис. 1 представлена схема синтеза полученных соединений.

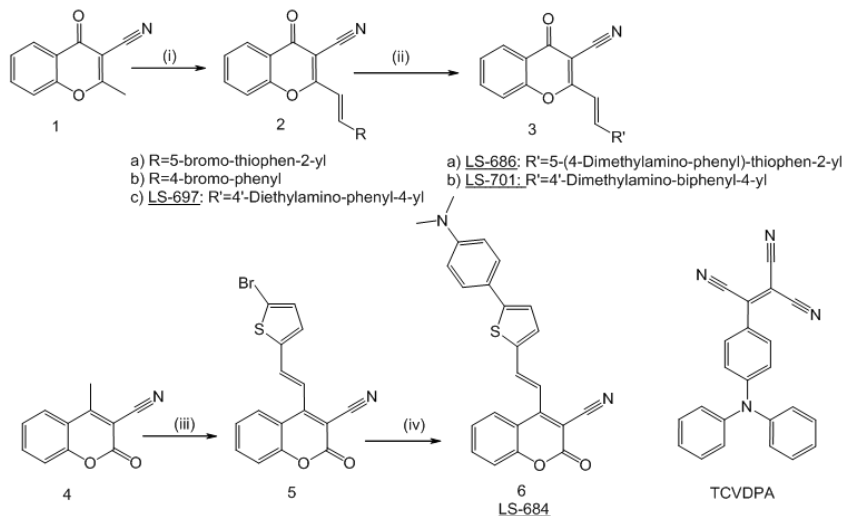


Рис. 1. Схема синтеза полученных соединений

Изучение спектральных характеристик полученных соединений показало, что соединения обладают интенсивными полосами поглощения с двумя максимумами. При переходе от 3-цианохромонов к 3-цианокумаринам наблюдается существенное bathochromное смещение полос поглощения от 17 до 77 нм. При этом 3-цианохромоны обладают в отличие от 3-цианокумаринов флуоресценцией в области 550-640 нм.

Сопоставление свойств полученных соединений со свойствами известных хромофоров, например, TCVDPA позволяет сделать вывод о перспективности дальнейшего изучения данных классов соединений и возможного их использования в электрооптических модуляторах.

Работа выполнена при поддержке РФФ 17-73-10433.

Список литературы

1. Qiu F., Yokoyama S. // Optics Express. 2016. V.24. Is.17. P.19020-19025.
2. Liu J., Xu G., Liu F., Kityk I., Liua X., Zhen Z. // RSC Adv. 2015. V.5. P.15784.

А.В. ПОДКОПАЕВ^{2,3}, А.И. МИСЬКЕВИЧ^{1,3}¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»²Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ³Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭКСИМЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ XeBr ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ Ar-Xe-C₂HBrClF₃ ЧАСТИЦАМИ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Представлены результаты экспериментального исследования спектрально-временных характеристик люминесценции эксимерной молекулы XeBr* в газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ высокого давления при возбуждении быстрыми электронами ($E_e = 150$ кэВ) и осколками деления урана-235 ($E_f = 100$ МэВ). Для смесей различного состава и давления измерены спектры люминесценции в диапазоне длин волн 200-1200 нм, времена высвечивания В-Х полосы эксимерной молекулы XeBr* ($\lambda_{\text{макс}} = 282$ нм) и определены константы тушения этой полосы молекулами фторотана (C₂HBrClF₃) и атомами Xe. Константа тушения и время высвечивания эксимерной молекулы XeBr* оказались равными $6,3 \cdot 10^{-10}$ (см³/с) и 125 нс соответственно, оптимальное давление C₂HBrClF₃ составляет $4 \div 6$ мТорр.

A. V. PODKOPEV^{2,3}, A. I. MIS'KEVICH^{1,3}¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)²Obninsk Institute of Atomic Energy NRNU MEPHI, Kaluga region³Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leipunsky, Obninsk, Kaluga region

EXPERIMENTAL RESEARCH OF XeBr EXCIMER MOLECULE LUMINESCENCE IN Ar-Xe- C₂HBrClF₃ GAS MIXTURE WITH HIGH ENERGY PARTICLES EXCITATION

The results of experimental research of spectral and time-resolved properties of XeBr excimer molecule luminescence in high-pressure gas mixtures of Ar-Xe-C₂HBrClF₃ under fast electron ($E_e = 150$ keV) and uranium-235 fission fragment ($E_f = 100$ MeV) excitation are represented. For mixtures of the different compositions and pressures are measured optical spectrums within the range of lengths of the waves 200-1200 nm, times of the flashing B-X bands excimer molecules XeBr* ($\lambda_{\text{max}} = 282$ nm) and are determined constants of the quenching of this band by molecule C₂HBrClF₃ and Xe. The quenching rate of XeBr* by Fluothane and fluorescence lifetime of XeBr* was found to be $6,3 \cdot 10^{-10}$ (cm³/s) and 125 ns respectively, the optimum pressure of C₂HBrClF₃ is equal to $4 \div 6$ mTorr.

Для исследования в качестве донора Вг эксимерной молекулы XeBr [1] была выбрана молекула фторотана $C_2HBrClF_3$. В экспериментах производилось возбуждение газовой смеси Ar-Xe- $C_2HBrClF_3$ пучком электронов [2], а так же осколками деления урана [3]. Во время экспериментов изменялось парциальное давление компонент смеси. На рис. 1 представлена зависимость обратного времени высвечивания от давления фторотана. Константа тушения $tg = (\alpha)$ $6,3 \cdot 10^{-10}$ (см³/с), время высвечивания $\tau_0 = 125$ нс.

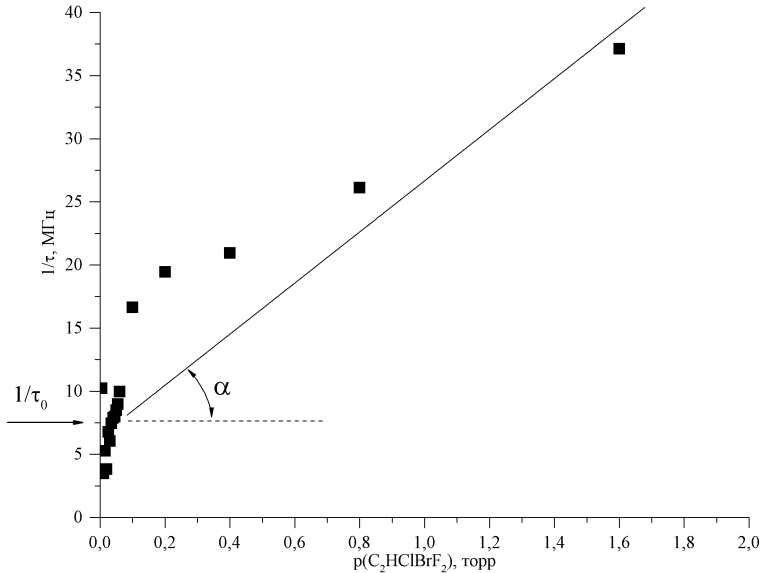


Рис. 1. Зависимость обратного времени высвечивания эксимерной молекулы XeBr (282 нм) от парциального давления $C_2HBrClF_3$ в смеси Ar-Xe- $C_2HBrClF_3$ атмосферного давления при возбуждении пучком электронов

Список литературы

1. Searles S.K., Hart G.A. Stimulated emission at 281.8 nm from XeBr // Applied Physics Letters. 1975. V.27. №4. P.243-245.
2. Миськевич А.И., Подкопаев А.В. Установка для исследования люминесценции, возбуждаемой заряженными частицами высокой энергии в плотных ксенонсодержащих газовых средах, с возможностью регенерации и повторного использования ксенона // Приборы и техника эксперимента. 2017. №3. С.154-159.
3. D'yachenko P.P., et al. STEND B reactor laser complex // Atomnaya Ehnergiya. 2000. T.88. №5. С 337-342.

Д.А. КИСЛОВ

Оренбургский государственный университет

УЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МОЛЕКУЛ КРАСИТЕЛЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК ГРЕТЦЕЛЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

При помощи модели разработанной профессором Кучеренко М.Г. было проведено математическое описание влияния наночастиц металла на поглощающую способность молекул органического красителя в ячейках Гретцеля. Рассчитаны усиленные спектры поглощения системы краситель-наночастица и вольт-амперные характеристики исследуемых солнечных ячеек.

D.A. KISLOV

Orenburg State University – Russia

TAKING INTO ACCOUNT THE INCREASE IN THE DYE MOLECULES ABSORPTIVITY IN MODELING OF GRAETZEL SOLAR CELL WITH METALLIC NANOPARTICLES

Using a model developed by Professor Kucherenko M.G. a mathematical description of the effect of metal nanoparticles on the absorbing capacity of organic dye molecules in Gretzel cells was carried out. The enhanced absorption spectra of the dye-nanoparticle system and the current-voltage characteristics of the investigated solar cells are calculated.

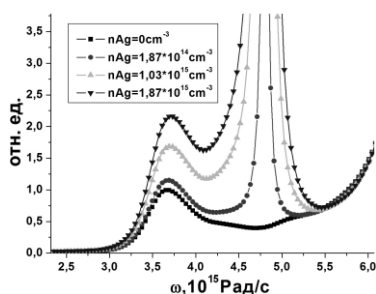


Рис. 1. Увеличение поглощательной способности молекул красителя в присутствии наночастиц серебра

Один из способов повышения КПД сенсibilизированных красителем солнечных элементов добавление в структуру пористого слоя диоксида титана, наночастиц металла.

На сегодняшний день опубликован ряд экспериментальных работ [1-3], в которых показано влияние наночастиц металла на работу ячеек, в частности на КПД. На наш взгляд ключевым эффектом здесь является изменение сечения поглощения молекул красителя наночастицами металла с плазмонными свойствами.

Для математического описания влияния наночастиц металла на поглощающую способность молекул органического красителя была использована модель разработанная профессором Кучеренко М.Г. [4]. Выражение для вероятности перехода с учетом усреднения по угловым координатам дипольного момента молекулы красителя p записывается следующим образом (рис. 1) [5]:

$$w(\omega, r) = \left(\frac{pE_0}{\hbar} \right) \frac{\gamma_D}{(\omega - \omega_{if})^2 + \gamma_D^2} \left(1 + \frac{8\text{Re}\alpha(\omega)}{\pi^2 r^3} + \frac{(7\pi^2 + 8)|\alpha(\omega)|^2}{5\pi^2 r^6} \right), \quad (1)$$

где $\alpha(\omega)$ - поляризуемость наночастицы [5].

На рис. 2 проведено сравнение расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик ячеек Гретцеля с различными концентрациями наночастиц серебра. Получено хорошее качественное и количественное согласование полученных результатов. Расчёты дают прирост КПД до 20% в случае использования наночастиц золота и увеличение в 2 раза для наночастиц серебра.

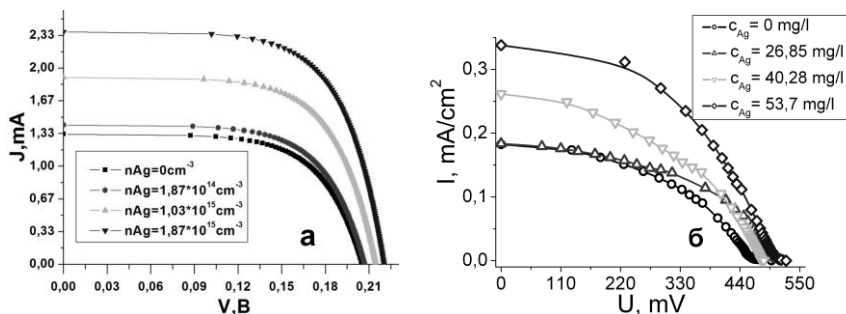


Рис. 2. ВАХ ячеек Гретцеля с добавлением в структуру разной концентрации наночастиц серебра: расчет (а); эксперимент [1] (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-04132\17_a и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (стипендия Президента Российской Федерации, № СП-1340.2015.1).

Список литературы

1. Kislov D.A. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.114.
2. Siu-Pang Ng., et al. // Solar Energy. 2014. V.99. P.115–125.
3. Qi J., et al. // ACS Nano. 2011. V.5(9). P.7108
4. Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Кучеренко М.Г. // Вестник ОГУ. 2014. Т.9(170). С.96.
5. Русинов А.П., Кучеренко М.Г. // Вестник ОГУ. 2015. Т.15(188). С.195.

Р.Е. ЯКУНЕНКОВ, К.И. КНЯЗЕВ, М.И. ФОКИНА, Н.А. ЗУЛИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКОГО КРАСИТЕЛЯ В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ В ПРИСУТСТВИИ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

Приведены результаты экспериментов по исследованию оптических свойств органического красителя Родамина Б (RB) в акрилатной полимерной матрице. Исследовано влияние плазмонного резонанса тонких плёнок золота, сформированных магнетронным распылением, на оптические свойства органических красителей в полимерной матрице. С помощью метода УФ-литографии получены микрорезонаторные структуры на основе полимерных композитов.

R.E. YAKUNENKOV, K.I. KNYAZEV, M.I. FOKINA, N.A. ZULINA
ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH OF ORGANIC DYES OPTICAL PROPERTIES IN POLYMER MATRIX WITH PRESENCE OF PLASMON RESONANCE

Present results of experiments on the optical properties of the organic dye Rodamin B (RB) in an acrylate polymer matrix. We studied the effect of the plasmon resonance in thin gold films formed by magnetron sputtering to the optical properties of organic dyes in the polymer matrix. Using the UV-lithography method, microresonator structures based on polymer composites were obtained.

Микрорезонаторы на основе органических красителей представляют собой перспективное направление в наноптонике и оптоинформатике [1]. Одним из направлений исследований является улучшение генерационных характеристик и усиления флуоресцентных свойств органических красителей, в том числе, с помощью явления плазмонного резонанса [2].

Целью данной работы является исследование влияния плазмонного резонанса золота на оптические свойства органических красителей RB в полимерной матрице на основе смеси акрилатов.

В качестве полимерной матрицы использовался композиция: Изодецилакрилат (IDA), 1,6-гександиолакрилат (DIOL) и 2 карбоксиэтилакрилат (2Carb), в массовом соотношении 45:45:10,

соответственно. Фотоинициатором для УФ-полимеризации являлся 2,2 диметокси-2фенилацетофенон (In2) с массовой долей 0,5 %. Концентрация красителя в полимерной матрице составила 0,05 % по массе. Плёнки золота, толщиной порядка 10 мкм, формировались на поверхности стеклянной подложки методом магнетронного распыления.

Спектры оптического поглощения полученных пленок приведены на рис. 1 и соответствуют пику плазмонного резонанса золота [3].

Жидкая мономерная композиция наносилась на поверхность образцов методом центрифугирования, после чего происходило формирование твердой полимерной пленки с красителями методом УФ-полимеризации в вакууме. Толщина плёнки составила порядка 50 мкм. Спектры флуоресценции Родамина Б в полимерной матрице с тонким слоем золота и без него приведены на рис. 2. Следует отметить усиление флуоресценции образцов с золотом при длине волны излучения 590 нм.

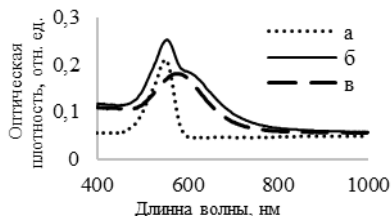


Рис. 1. Спектры оптического поглощения Родамином Б в полимерной матрице: в отсутствии (а) и присутствии (б) плазмонного резонанса и пик поглощения плёнки золота (в)

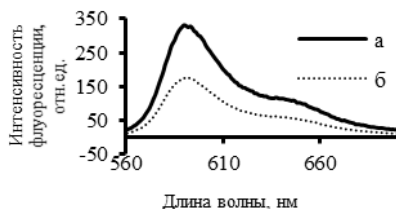


Рис. 2. Спектры флуоресценции Родамином Б в полимерной матрице в присутствии (а) и отсутствии (б) плазмонного резонанса

Список литературы

1. McFarlane S., Manchee C.P., Silverstone J.W., Veinot J., Meldrum A. Synthesis and Operation of Fluorescent-core Microcavities for Refractometric Sensing // J Vis Exp. 2013. V.73.
2. Huang Q., Zhan X., Hou Zh., Chen Q., Xu H. Polymer photonic-molecule microlaser fabricated by femtosecond laser direct writing // Optics Communications. 2015.
3. Caoa J., Suna T., Grattan K.T.V. // Sensors and Actuators B: Chemical. 2014. V.195. P. 332-351.

К.Н. БОЛДЫРЕВ, А.Д. МОЛЧАНОВА, Р.В. ПИСАРЕВ¹

Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ В-Т ДИАГРАММЫ МЕТАБОРАТА МЕДИ CuB_2O_4 ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО ДИХРОИЗМА

Выполнены исследования спектров линейного антиферромагнитного дихроизма тонкой пластинки метабората меди в температурном диапазоне 4 – 22 К и в магнитных полях 0 – 25 мТл (в геометрии Фойгта и Фарадея). Обнаружены проявления изменения характера дихроизма при магнитных фазовых переходах, такие как смена знака, уменьшение и увеличение сигнала дихроизма при различных магнитных фазовых переходах. Кроме того, было исследовано пропускание при различных знаках внешнего магнитного поля, которое также показывает особенности при магнитных фазовых переходах. Настоящее исследование дает дополнительную информацию о природе чрезвычайно сложной магнитной фазовой диаграммы метабората меди.

K.N. BOLDYREV, A.D. MOLCHANOVA, R.V. PISAREV¹

Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk

¹*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

INVESTIGATION OF THE PHASE B-T DIAGRAM OF THE COPPER METABORATE CuB_2O_4 BY THE OPTICAL METHOD OF LINEAR ANTIFERROMAGNETIC DICHROISM

The spectra of the linear antiferromagnetic dichroism of a thin plate (50 μm) of copper metaborate are studied in the temperature range 4–22 K and in magnetic fields 0–25 mT (in the Voigt and Faraday geometry). The manifestations of the change in the character of dichroism during magnetic phase transitions, such as a sign change, a decrease and an increase in the dichroism signal at the points of various magnetic phase transitions, are observed. In addition, the optical transmission at different signs of an external magnetic field, which also shows singularities in magnetic phase transitions, was investigated. This study provides additional information on the nature of the extremely complex magnetic phase diagram of copper metaborate.

Монокристалл CuB_2O_4 – интересный объект исследования в различных областях физики, таких как магнетизм, кристаллофизика, оптика, что обусловлено рядом уникальных свойств этого соединения. Он обладает сложной кристаллической структурой, имеющей 42 атома на примитивную

ячейку с двумя неэквивалентными квадратно-координированными позициями меди, и описывается нецентросимметричной группой симметрии $I42d$ [1]. Взаимодействие различных магнитных подрешеток меди приводит к богатой магнитной фазовой диаграмме с каскадами магнитных фазовых переходов, природа которых до сих пор до конца не изучена [2]. Кроме того, метаборат меди обладает уникальным оптическим спектром [3]. Так, в спектре наблюдаются все узкие бесфонные линии от двух позиций двухвалентной меди, и поведение этих линий позволяет судить о процессах, происходящих в кристалле. Так, в работе [4] был обнаружен линейный антиферромагнитных дихроизм на линиях меди в позиции $4b$. Этот метод показал большую чувствительность к магнитным фазовым переходам, и позволил не только обнаружить новый магнитных фазовый переход, но и также рассказать о природе и характере других наблюдаемых фазовых переходов [4]. Дальнейшие исследования показали применимость метода и для смешанных соединений метабората меди (Cu,Mn) B_2O_4 [5].

В настоящей работе выполнено исследование линейного антиферромагнитного дихроизма тонкой пластинки метабората меди (50 мкм), вырезанной перпендикулярно оптической оси ($\mathbf{k} \parallel c$) во внешних магнитных полях геометрии Фойгта и Фарадея ($\mathbf{B}_{\text{ext}} \perp \mathbf{k}$ и $\mathbf{B}_{\text{ext}} \parallel \mathbf{k}$, соответственно) с индукцией до 25 мТл. Обнаружены проявления измерения характера дихроизма при магнитных фазовых переходах, такие как смена знака, уменьшение и увеличение сигнала дихроизма при различных магнитных фазовых переходах. По полученным данным построена уточненная фазовая В-Т диаграмма метабората меди и дана интерпретация наблюдаемым изменениям сигнала дихроизма при магнитных фазовых переходах. Также была зарегистрирована разница в величине пропускания при изменении знака внешнего магнитного поля, где на полевой и температурной зависимости также наблюдаются особенности при магнитных фазовых переходах. Все это свидетельствует о более сложных физических процессах, происходящих в метаборате меди под действием температуры и магнитного поля, чем считалось ранее.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых кандидатов МК-3577.2017.2.

Список литературы

1. Pisarev R., Boldyrev K., Popova M., et al. // Phys. Rev. B. 2013. V.88. P.024301.
2. Панкрац А.И., Петраковский Г.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.78. С.1058.
3. Pisarev R., Kalashnikova A., et al. // Phys. Rev. B. 2011. V.84. P.075160.
4. Boldyrev K.N., Pisarev R.V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V.114. P.247210.
5. Molchanova A.D., Boldyrev K.N., et al. // J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. V.917. P.072003.

А.Ю. АВДИЖИЯН, С.Д. ЛАВРОВ, А.П. ШЕСТАКОВА
Московский технологический университет (МИРЭА)

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств двумерных образцов твёрдых растворов дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) на основе $\text{Mo}_{(1-x)}\text{W}_{(x)}\text{S}_{(1-y)}\text{Se}_{(y)}$ методами оптической микроскопии, электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, нелинейно-оптической спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии.

A. Yu. AVDIZHIYAN, S.D. LAVROV, A.P. SHESTAKOVA
Moscow Technological University (MIREA)

OPTICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS OF DICHALCOGENIDES OF TRANSITION METALS

This paper presents the investigation of the optical two-dimensional samples of solid solutions of transition metal dichalcogenides (TMDC) based on $\text{Mo}_{(1-x)}\text{W}_{(x)}\text{S}_{(1-y)}\text{Se}_{(y)}$ properties results by optical microscopy, electron microscopy, atomic-force microscopy, nonlinear optical spectroscopy and photoluminescence spectroscopy.

Наличие прямой запрещённой зоны у таких двумерных материалов, как дихалькогениды переходных металлов позволяет использовать их в производстве широкого спектра оптических устройств [1]. Для увеличения спектральной эффективности устройств фотовольтаики и фотодетектирования важной является возможность изменения ширины запрещённой зоны. Одной из методик контроля ширины запрещённой зоны является варьирование толщиной образцов [2].

Наиболее эффективной методикой является контроль запрещённой зоны путем изменения состава полупроводниковых материалов [3, 4]. Использование этого метода позволяет значительно увеличить эффективность устройств фотовольтаики. Были созданы фотодетекторы на основе $\text{Mo}_{0,5}\text{W}_{0,5}\text{S}_2$ со стабильным фотооткликом в широком диапазоне длин волн [5].

Целью работы является изучение оптических свойств четырёхкомпонентных твердых растворов ДПМ. Наиболее важной задачей является оценка влияния концентраций отдельных веществ в

образце на спектр фотолюминесценции и, как следствие, на ширину запрещённой зоны.

Методом электронной микроскопии проводился сбор данных о геометрических параметрах кристаллитов ДПМ. Информация о составе образцов была получена методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Также, с помощью нелинейной конфокальной оптической спектроскопии были получены данные о кристаллографической ориентации и наличии искажений запрещённой зоны на краях образцов. Были получены результаты люминесцентной спектроскопии для нескольких образцов разных составов (рис. 1 и 2). На рис. 1 продемонстрировано оптическое изображение образца, а на рис. 2 приведено его флуоресцентное изображение.



Рис. 1. Оптическое изображение отдельного кристаллита ДПМ

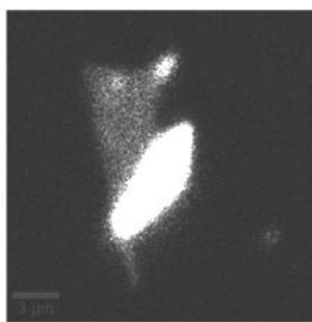


Рис. 2. Люминесцентное изображение отдельного кристаллита ДПМ

Список литературы

1. Splendiani A., et al. Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂ // Nano Lett. 2010. V.10, №4. P.1271–1275.
2. Wang Q.H., et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides // Nat. Nanotechnol. 2012. V.7. №11. P.699–712.
3. Yang L., et al. Large-area synthesis of monolayered MoS_{2(1-x)}Se_{2x} with a tunable band gap and its enhanced electrochemical catalytic activity // Nanoscale. 2015. V.7. №23. P.10490–10497.
4. Huang J., et al. Stable electrical performance observed in large-scale monolayer WSe_{2(1-x)}S_{2x} with tunable band gap // Nanotechnology. 2016. V.27. №13. P.13LT01.
5. Yao J., Zheng Z., Yang G. Promoting the Performance of Layered-Material Photodetectors by Alloy Engineering // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. V.8. №20. P.12915–12924.

А.А. БОЧАРОВ, М.Г. РЫБИН¹, А.Н. ФУРОВ, И.И. КОНДРАШОВ¹,
Е.Д. ОБРАЗЦОВА¹, А.Д. ЕРМАКОВ

Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого, Серпухов

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФЕНОВОГО ФОТОДЕТЕКТОРА И СЦИНТИЛЛЯТОРА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты исследования возможности создания детектора гамма-излучения на основе графенового фотодетектора и сцинтилляторов. Создан графеновый фотодетектор, чувствительный к ультрафиолетовому излучению. Проведены измерения изменения фотосопротивления созданного детектора. Предполагается использование сцинтиллятора для переизлучения гамма-излучения в ультрафиолетовую область и его детектирования за счет изменения фотосопротивления.

A.A. BOCHAROV, M.G. RYBIN¹, A.N. FUROV,

I.I. KONDRASHOV¹, E.D. OBRAZTSOVA¹, A.D. ERMAKOV

Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Serpukhov

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

APPLICATION OF THE GRAPHENE PHOTODETECTOR AND SCINTILLATOR FOR DETECTING GAMMA- RADIATION

The results of the investigation of the possibility of creating a gamma-ray detector based on a graphene photodetector and scintillators are presented. A graphene photodetector, sensitive to ultraviolet radiation, is created. Measurements of the change in the photoresistance of the created detector are carried out. It is proposed to use a scintillator to re-emit gamma radiation to the ultraviolet region and to detect it by changing the photoresistance.

Детектирование гамма-излучения имеет большую актуальность для исследований в области прикладной физики. При изучении различных вопросов ядерной техники в большинстве случаев необходимо проводить измерения характеристик источников ионизирующего излучения. При работе с ними необходимо обеспечивать соблюдения требований ядерной и радиационной безопасности, для чего должен обеспечиваться дозиметрический контроль. Основным элементом дозиметра, как

измерительного прибора, является чувствительный элемент. Относящиеся к ним счетчик Гейгера-Мюллера, сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы обладают рядом недостатков. Предлагается использование графенового фотодетектора, как чувствительного элемента детектора дозиметра.

Целью работы является экспериментальное исследование созданного графенового детектора. В ходе исследования была обнаружена значительная чувствительность к ультрафиолетовому излучению. Для эксперимента были созданы три образца: исходный, представляющий собой подложку SiO_2 со слоем графена и двумя контактами из графеновой пасты; допированный кислотой, покрытый полимером ПММА. На рис. 1 представлен график, показывающий изменение фотосопротивления последнего образца, при включении ультрафиолетовой лампы (характерное возрастание фотосопротивления).

Анализ результатов позволяет подобрать необходимый сцинтиллятор для регистрации гамма-излучения.

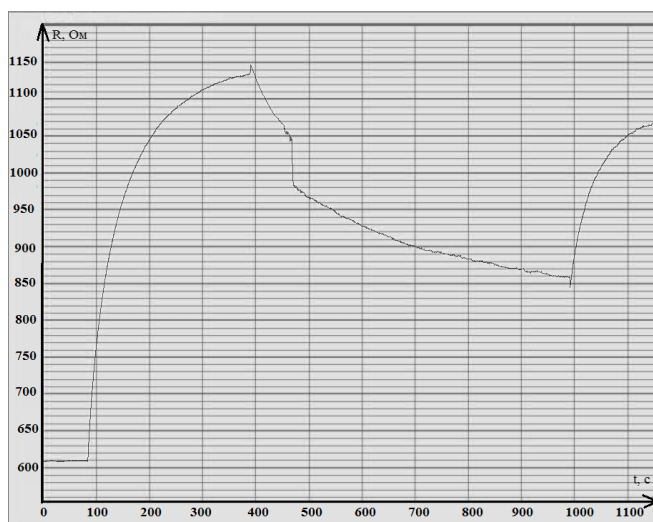


Рис. 1. Изменение фотосопротивления графенового фотодетектора, покрытого ПММА

Список литературы

1. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1972.

К.В. ОРЕШКИНА, В.Д. ДУБРОВИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

БРОМИДНЫЕ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫЕ СТЕКЛА С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ФТОРА

Представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных и оптических свойств бромидных фототермоурефрактивных стекол с пониженным содержанием фтора и различным содержанием серебра. Предложен механизм формирования наночастиц серебра и нанокристаллов бромида серебра в стеклах с различным содержанием серебра.

K.V. ORESHKINA, V.D. DUBROVIN
ITMO University, Saint-Petersburg

BROMIDE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS WITH LOW FLUORINE CONCENTRATION

The results of spectral-luminescent and optical properties study of bromide photo-thermo-refractive glass with low fluorine concentration and different silver concentration are presented. The mechanism of the silver nanoparticles and silver bromide nanocrystals formation in glass with different silver concentration are proposed.

Фототермоурефрактивные (ФТР) стекла представляют собой многокомпонентные фоточувствительные стекла с добавками галогенидов [1]. Они являются перспективным материалом для создания на его основе голографических оптических элементов и устройств для фотоники, интегральной оптики и наноплазмоники [2].

Последовательные УФ-облучение и термообработка (ТО) выше температуры стеклования (T_g) позволяют сформировать в объеме классических ФТР стекол наночастицы серебра, а затем вырастить на них кристаллическую фазу NaF [3]. Поскольку показатель преломления NaF ($n = 1.33$) меньше, чем показатель преломления матрицы стекла ($n = 1.5$), выделение нанокристаллов приводит к уменьшению показателя преломления в УФ облучённой и ТО области, что позволяет использовать данные стекла для записи голограмм, но не подходит для создания волноводных структур [4]. В ФТР стекле с пониженным содержанием фтора на наночастицах серебра происходит рост кристаллической фазы AgBr, имеющий больший показатель преломления ($n = 2.2$), чем у

матрицы стекла [4], вследствие чего в таком стекле возможна запись 3D волноводных и интегрально-оптических структур.

В работе были синтезированы ФТР стекла $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ системы с добавлением Br, фотосенсибилизаторов CeO_2 и Sb_2O_3 , с переменным содержанием Ag_2O от 0.006 до 0.080 мол.% по синтезу. Стекла синтезировались в кварцевых тиглях при температуре 1450°C с перемешиванием расплава платиновой мешалкой в воздушной атмосфере. T_g измерялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии и составила $494 \pm 3^\circ\text{C}$ для всех стекол. Образцы облучались УФ-излучением ртутной лампы и ТО 1-10 часов при температурах ниже и выше T_g . Спектры поглощения и люминесценции измерялись на спектрофотометре Lambda 650 и многоканальным приемником Hamamatsu с интегрирующей сферой соответственно. Показатель преломления был измерен на рефрактометре Аббе ИРФ-454БМ. Рентгенофазовый анализ был проведен с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima IV.

В работе показано:

- 1) увеличение количества серебра не оказывает существенного влияния на спектры поглощения исходного ФТР стекла;
- 2) УФ-облучение и ТО при температурах ниже T_g приводят к формированию серебряных молекулярных кластеров, обладающих широкополосной люминесценцией в видимом и ближнем ИК-диапазонах;
- 3) увеличение количества серебра приводит к росту интенсивности люминесценции серебряных молекулярных комплексов;
- 4) УФ-облучение и длительная ТО при температурах ниже T_g приводят к росту наночастиц серебра только в стеклах с низкой концентрацией серебра;
- 5) УФ-облучение и ТО выше T_g приводят к росту наночастиц серебра с оболочкой из AgBr, что вызывает локальное увеличение показателя преломления $+\Delta n \sim 900 \text{ ppm}$.
- 6) предположительный механизм формирования наночастиц серебра в ФТР стеклах с пониженным содержанием фтора.

Список литературы

1. Nikonov N.V., Panysheva E.I., Tunimanova I.V., Chukharev A.V. // Glass Phys. Chem. 2001. V.27. №3. P.241-249.
2. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Харченко М.В. // Физика и химия стекла. 1993. Т.19. №3. С.442-448.
3. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Чухарев А.В. // Физика и химия стекла. 2001. Т.27. №3. С.365-376.
4. Nikonov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A., Lazareva K.E. // Opt. Spectrosc. 2009. V.107. №5. P.745-747.

Д.Ю. ЕРИН^{1,2}, С.Л. СЕМЁНОВ¹, О.Н. ЕГОРОВА¹,
Л.Д. ИСХАКОВА¹, Ф.О. МИЛОВИЧ¹, С.Г. ЧЕРНООК¹

¹Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

²Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл.

АКТИВНЫЕ СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ АЛЮМОФОСФОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С ИОНАМИ ИТТББИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Описаны результаты исследования активных волоконных световодов, изготовленных методом «штабик-в-трубке». В сердцевине волокна обнаружены наночастицы фосфата иттербия, которые ухудшают качество световодов.

D.Yu. ERIN^{1,2}, S.L. SEMJONOV¹, O.N. EGOROVA¹,
L.D. ISKHAKOVA¹, F.O. MILOVICH¹, S.G. CHERNOOK¹

¹Fiber Optic Research Center of the RAS, Moscow

²Zababakhin All-Russia research institute of technical physics, Snezhinsk,
Chelyabinsk region

GLASSES FOR ACTIVE OPTICAL FIBERS MANUFACTURED BY CONTAINERLESS MELTING GLASS

The results of the research of active optical fibers fabricated by “a rod -in- tube” were described. Glass core derived from the melting of the powder containerless way.

Трудность изготовления волоконных световодов с сердцевинной из многокомпонентного стекла заставляет искать новые подходы к решению этой задачи. Главным требованием к таким стеклам остается однородность его состава. В методе химического осаждения это задача решается подходом «снизу-вверх». На опорную трубу напыляются как можно тоньше слои стекла сердцевинной. Однако, также существует подход «сверху-вниз». Изначально берется неоднородный материал и за счет технологических процессов достигается требуемая однородность. Из-за продолжительного времени и высокой температуры диффузии легирующих компонентов кварцевого стекла широкое распространение получил подход «снизу-вверх».

В данной работе мы попытались минимизировать «минусы» второго подхода и раскрыть его «плюсы». В обычной реализации подхода

«сверху-вниз» - наплава шихты из тигля мы сталкиваемся с непреодолимыми противоречиями (в рамках изготовления стекол для волоконной оптики). С одной стороны, для увеличения скорости диффузии необходима высокая скорость перемешивания и температура расплава. С другой, последние 2 фактора увеличивают степень загрязнения расплава за счет растворения материала тигля. Учитывая эти противоречия, мы разработали метод бесконтейнерной плавки стекломассы с использованием виброперемешивания расплава. Сущность метода заключается в следующем. Шихта спекалась в кварцевой трубе. Затем в спеченный материал, нагретый до температуры 1600-2000 °С, вводились низкочастотные колебания для интенсификации процессов гомогенизации и осветления расплава. На полученный в результате такого процесса стержень нахлопывалась оболочка из кварцевого стекла Suprasil F300. Таким образом, получалась заготовка для вытяжки волоконных световодов.

В данной работе исследовались стекла состава $99,45\text{SiO}_2-0,5\text{Al}_2\text{O}_3-0,05\text{Yb}_2\text{O}_3$. Концентрация алюминия подбиралась таким образом, чтобы разница показателя преломления относительно кварцевого стекла составляла $\Delta n = 0,001-0,002$. Такое соотношение позволяло изготовить одномодовые световоды с большим полем моды.

Анализ степени однородности материала осуществлялся с помощью сканирующего электронного микроскопа. Концентрация легирующих элементов варьировалась в пределах 10-20 % относительно среднего уровня легирования.

Для определения уровня поглощения в материале был вытянут маломодовый световод 17/125 мкм с защитной оболочкой из акрилата. Поглощение в области низких потерь в этом световоде составили порядка 100-150 дБ/км.

Для исследования генерационных свойств был вытянут световод 13/125 мкм в светоотражающим полимере. Длина волны отсечки полученного световода была в районе 1,06-1,07 мкм. Поглощение на $\lambda = 915\text{нм}$ составляло около 2 db/m. Эффективность лазерной генерации на длине 10м составила 76 %. Порог лазерной генерации составил 1,2 Вт.

Таким образом, результаты исследования полученных световодов из стекла, изготовленного методом бесконтейнерной плавки с использованием виброперемешивания, показали хорошие характеристики и могут быть при оптимизации технологии использоваться в случаях, когда методом MCVD трудновыполнимо получить необходимые световоды.

Большое развитие в последнее время получили волоконные лазеры, основанные на волокнах, легированных редкоземельными ионами. В частности на волокнах с ионами иттербия продемонстрированы мощные киловаттные лазеры. В тоже время, традиционный метод MCVD изготовления световодов сталкивается с ограничениями при решении подобных задач. В последнее время получили альтернативные методы получения стекла для сердцевин активных волокон. Среди таких методов выделяется золь-гель технология. Основными требованиями к получаемым световодам является высокая однородность состава сердцевины, низкая разница показателя преломления относительно кварцевого стекла, высокая концентрация лазерного иона. Таким условиям удовлетворяют стекла состава $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Yb}_2\text{O}_3$. Было показано, что при низкой числовой апертуры световодов, в них могут быть достигнуто высокая концентрация ионов иттербия при слабовыраженном процессе фотопотемнения.

В данной работе для изготовления стекла сердцевины волокна был использован метод бесконтейнерного плавления с использованием вибраций расплава для интенсификаций процессов диффузии и осветления. Обычные методы изготовления стекол такой системы имеют ряд ограничений. Из-за сильной реакционной способности расплава идет растворения стенок тигля и загрязнения расплава. Кроме того, из-за медленного процесса диффузии в кварцевом стекле и высокой температуре плавления, могут не войти в состав легкоплавкие примеси.

Для изготовления стекла использовались порошки оксидов и солей элементов стекла марки «ОСЧ» с размерами гранул 20-100 мкм. Перемешанная шихта отжигалась на кварцевой пластине. Полученный спеченный слиток приваривался к кварцевому стержню, закрепленного в стеклодувном станке. Затем слиток оплавлялся в пламени газовой горелки. После в расплав вводились низкочастотные колебания частотой 5-10 Гц. Продолжительность обработки составляла около 1 часа. На полученный стержень активного стекла жакетировалась труба из чистого кварцевого стекла Suprasil F 300.

К.Б. ЮШКОВ, Н.Ф. НАУМЕНКО, В.Я. МОЛЧАНОВ
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ В МИКРОСКОПИИ

Приведены результаты анализа гиперспектральной акустооптической системы с пространственной фильтрацией изображений на основе свойств симметрии двумерной передаточной функции неколлинеарного акустооптического фильтра. Экспериментально продемонстрирована визуализация фазовой структуры в неокрашенных препаратах тканей и клеток при некогерентном освещении образцов.

K.B. YUSHKOV, N.F. NAUMENKO, V.Ya. MOLCHANOV
National University of Science and Technology MISIS, Moscow

ACOUSTO-OPTICAL SPATIAL IMAGE FILTERING FOR PHASE OBJECT VISUALIZATION IN MICROSCOPY

The report presents the analysis of a hyperspectral imaging system with spatial image filtering based on symmetry properties of a noncollinear acousto-optic tunable filter transfer function. The experiments demonstrated visualization of the phase structure in unstained samples of tissues and cells with incoherent object illumination.

Гиперспектральные акустооптические системы находят все более широкое применение в биомедицинских исследованиях [1]. Акустооптические системы позволяют регистрировать спектральное изображение целиком, последовательно перестраивая пропускаемую фильтром длину волны света. Пространственная функция пропускания такой системы зависит как от характеристик акустооптического фильтра, так и от конфигурации оптической системы [2-5].

Целью работы является анализ и экспериментальное исследование конфокальной акустооптической гиперспектральной системы. Такая система обеспечивает наименьший диаметр функции рассеяния точки и спектральная функция пропускания не зависит от пространственной координаты в плоскости детектора, что обеспечивается телецентрической оптикой [2-5]. Важное свойство конфокальной акустооптической системы заключается в том, что угловой спектр пучка в плоскости акустооптического фильтра пропорционален пространственной функции

пропускания телецентрической диафрагмы. Использование диафрагмы темного поля позволяет блокировать низкие частоты углового пространственного спектра. При этом фазовый синхронизм в акустооптическом фильтре будет наблюдаться на длине волны, отличной от номинальной длины волны для данной частоты ультразвука и определяемой структурой двумерной передаточной функции [6-8]. При использовании кольцевого пространственного фильтра фазовый синхронизм выполняется в полосе длин волн, равной по порядку величины ширине аппаратной функции фильтра. Благодаря этому, пространственные координаты в плоскости диафрагмы однозначно соответствуют пространственным частотам углового спектра пучка [9]. При прохождении через фазовый объект плоская волна испытывает пространственно неоднородную задержку волнового фронта. Низкие частоты углового спектра, отвечающие за фон изображения, блокируются диафрагмой темного поля, а более высокие частоты пропускаются ей, после чего пучок монохроматизируется акустооптическим фильтром. Таким образом достигается эффект повышения контраста фазового объекта. Без телецентрической диафрагмы оптическая система работает в режиме обыкновенного гиперспектрального анализа в светлом поле.

Экспериментальная установка была создана на основе стандартного инвертированного светового микроскопа и оригинальной гиперспектральной системы пространственной фильтрации с акустооптическим фильтром высокого разрешения. Результаты экспериментов с некрашеными препаратами тканей и клеток продемонстрировали эффективное увеличение контраста фазовых объектов [9]. Данная система может быть использована как дополнительное средство визуализации микропрепаратов при различных видах медицинских исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-07-00279.

Список литературы

1. Lu G., Fei B. // *J. Biomed. Opt.* 2014. V.19 (1). P.010901.
2. Suhre D.R., Gupta N. // *Appl. Opt.* 2005. V.44 (27). P.5797.
3. Voloshinov V.B., Yushkov K.B., Linde B.B.J. // *J. Opt. A.* 2007. V.9 (4). P.341.
4. Anikin S.P., et al. // *Opt. Spectrosc.* 2016. V.121 (1). P.115.
5. Machikhin A., Batshev V., Pozhar V. // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2017. V.34 (7). P.1109.
6. Balakshy V.I., Voloshinov V.B. // *Quant. Electron.* 2005. V.35 (1). P.85.
7. Balakshy V.I., Kostyk D.E. // *Appl. Opt.* 2009. V.48 (7). P.C24.
8. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., Belousov P.V., Abrosimov A.Yu. // *J. Biomed. Opt.* V.21 (1). P.016003.
9. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya. // *J. Biomed. Opt.* V.22 (6). P.066017.

А.Л. ФИЛАТОВ

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

**ПОДАВЛЕНИЕ НУЛЕВОГО ПОРЯДКА
АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ РАСХОДЯЩЕГОСЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УЗКОПОЛОСНЫМ
АКУСТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ**

Предложен новый акустооптический метод повышения суммарной эффективности дифракции лазерного излучения, сфокусированного в зону взаимодействия света и звука. Метод основан на использовании узкополосных управляющих сигналов, которые обеспечивают лучший режим синхронизма для всех углов в перетяжке лазерного излучения, чем одночастотный управляющий сигнал. Экспериментально исследованы две технологии формирования таких сигналов: первая разработана на базе известной многочастотной высокоэффективной дифракции, вторая использует ранее не применявшиеся в акустооптике шумоподобные сигналы. Показано, что обе эти технологии по сравнению с одночастотной технологией в разы уменьшают интенсивность в нулевом порядке акустооптической дифракции для сильно сфокусированного лазерного излучения.

A.L. FILATOV

Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

**A NARROW-BAND ACOUSTIC SIGNAL FOR A ZERO ORDER
SUPPRESSION OF ACOUSTO-OPTIC DIFFRACTION
OF A STRONGLY FOCUSED LASER BEAM**

New acousto-optic technique application is proposed to increase the efficiency of diffraction of laser light focused in the interaction zone of light and sound. This technique is based on usage of narrowband control signals, which provide better synchronism for all angles in the waist of laser radiation than a single-frequency control signal. Two technologies for the formation of such signals have been experimentally investigated: the first is based on the known multi-frequency high-efficiency diffraction, the second used noise-like signals that were not previously was not considered in acousto-optics. It is shown that both these technologies, in comparison with single-frequency one, decrease by several times the zero-order intensity of acousto-optic diffraction for strongly focused laser radiation.

Быстродействие акустооптических модуляторов (АОМ) определяется временем прохождения звуковой волной перетяжки сфокусированного

лазерного излучения. Однако при уменьшении размеров перетяжки увеличивается угловая апертюра излучения и, как видно из показанной на рис. 1 [1] векторной диаграммы анизотропной дифракции расходящегося света, нарушается режим акустооптического синхронизма для части углов исходного излучения I_i и одночастотной звуковой волны k_s . При этом уменьшается эффективность АОМ, так как в брэгговский порядок I_d переходит только часть исходного излучения. В данной работе для повышения эффективности АОМ в рассматриваемом случае предлагается использовать, во-первых, известную технику многочастотной высокоэффективной дифракции [2], во-вторых, шумоподобные сигналы, не применявшиеся ранее в акустооптике. На рис. 2 показана трансформация нулевого порядка дифракции в зависимости от подаваемых на АОМ сигналов управления, полученная на экспериментальной установке, аналогичной описанной в [2]. График 1 соответствует профилю исходного излучения с расходимостью 10 мрад без подачи сигнала на АОМ, график 2 - профилю нулевого порядка дифракции при подаче одночастотного сигнала управления 41.5 МГц, график - 3 профилю при подаче трех частот управляющего сигнала: центральная 41.5 МГц и две боковые 37.3 МГц и 45.7 МГц. Видно, что при одночастотном сигнале из углового спектра падающего луча вырезается только центральная часть, и интенсивность нулевого порядка составила 30% от исходного. При трехчастотном сигнале интенсивность нулевого порядка значительно снижается, и составляет $\approx 8\%$.

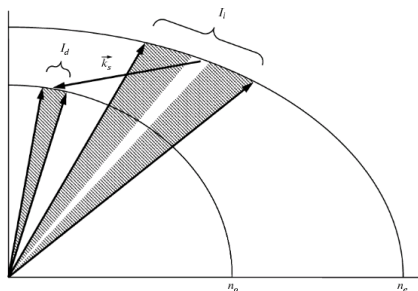


Рис. 1. Векторная диаграммы анизотропной дифракции расходящегося света

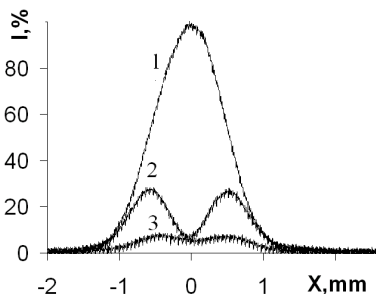


Рис. 2. Трансформация нулевого порядка дифракции, в зависимости от подаваемых на АОМ сигналов управления

Список литературы

1. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Янгиров И.Ф. // Радиотехника и электроника. 2011. Т.56. №7. С.889-895.
2. Антонов С.Н., Филатов А.Л. // ЖТФ. 2018. Т.88. №1. С.93-97.

С.В. БОРИТКО, В.Э. ПОЖАР, А.В. КАРАНДИН

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ВОЗМОЖНОСТЬ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОИЗВОДНЫХ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА МЕТОДАМИ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

На примере разработанного в НТЦ Уникального приборостроения РАН спектрометра на основе акустооптической (АО) ячейки со скачкообразной фазовой манипуляцией для задач дифференциальной спектроскопии показана перспективность создания нового класса приборов – модуляционных АО спектрометров. Приведены результаты детального исследования дифференциального АО спектрометра с произвольной адресацией и показано, что он не требует сканирования по спектру и потому сокращает время измерений.

S.V. BORITKO, V.E. POZHAR, A.V. KARANDIN

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

OPPORTUNITY OF DIRECTLY REGISTRATION OF DIFFERENTIATED OPTICAL SPECTRA BY THE METHOD OF ACOUSTO-OPTICAL SPECTROSCOPY

Using as example the developed in STC UI RAS acousto-optical spectrometer, which employs the technique of phase switching, targeted at the differential spectroscopy applications, we demonstrate fruitful prospects of new class of instruments, which are modulation-mode acousto-optical spectrometers. We present the results of its comprehensive testing and prove the time-saving capabilities based on random spectral access.

Основной задачей спектрометрии является точное определение положения спектральных составляющих спектра. Часто встречаемая ситуация состоит в том, что в спектре на фоне мощного широкого пика расположен более узкий и менее мощный пик. В этом случае измерение спектрального положения меньшего максимума происходит с существенной ошибкой. Выходом из данной ситуации является дифференцирование спектральной информации. Следует заметить, что применение дифференцирования высших (четных) порядков существенно увеличивает спектральное разрешение при анализе спектров. Следует отметить, что на сегодняшний день, существует мало работ, направленных на развитие данного подхода.

Рассматриваемый нами путь основан на применении не вычислительных методов, а методов связанных с непосредственным измерением производных спектра. В этом случае отпадает вопрос о возможном искажении (или потере) спектральной информации при предварительном «сглаживании» перед процедурой дифференцирования.

В работе описан, разработанный в НТЦ УП РАН макет дифференциального акустооптического (АО) спектрометра. В основе его работы лежит теория дифракции света на акустической волне со скачкообразной фазовой манипуляцией [1, 2]. На рис. 1 показан участок зарегистрированного спектра неоновой лампы, а так же его первой и второй производной. Из графика видно, что созданный макет довольно эффективно регистрирует как спектр оптического сигнала, так и его производные.

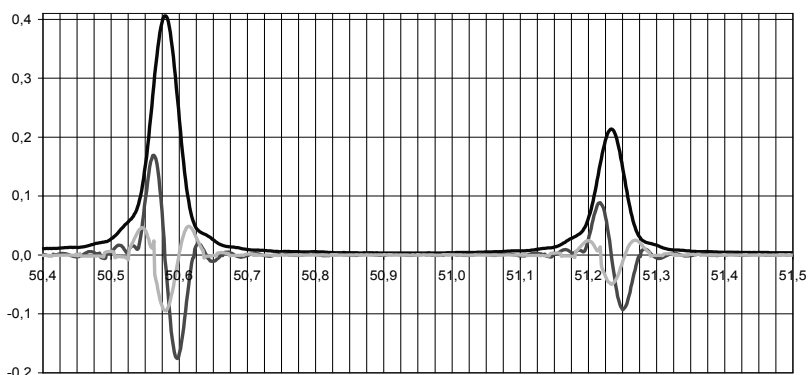


Рис. 1. Часть спектра неоновой лампы, зарегистрированная дифференциальным АО спектрометром

Следует отметить, что в связи с развитием цифровой высокочастотной техники расширяются возможности синтеза электрических сигналов сложной формы и, следовательно, возможности возбуждения акустических волн "неординарной" структуры, что открывает перспективы создания АО устройств с новыми, подчас неожиданными свойствами.

Список литературы

1. Пустовойт В.И., Пожар В.Э. // Радиотехника и электроника. 1998. Т.43(1). С.121.
2. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. В.9. С.47.

В.М. КОТОВ, Г.Н. ШКЕРДИН, С.В. АВЕРИН
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ЛУЧА С ВРАЩАЮЩИМСЯ ВЕКТОРОМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Предложена методика получения оптического излучения с вращающимся вектором поляризации, основанная на интерференции двух лучей с циркулярными поляризациями и разными частотами. Сдвиг частот между лучами осуществляется посредством акустооптической (АО) дифракции. Метод использован для получения амплитудной модуляции излучения с частотой n_f , где f - частота звуковой волны, n — целое число. Созданы АО модуляторы на основе кристалла парателлурита, с помощью которых оптическое излучение с длиной волны 0,63 мкм промодулировано по амплитуде на учетверенной звуковой частоте. Частота модуляции составила ~180 МГц.

V.M. KOTOV, G.N. SHKerdin, S.V. AVERIN
Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

FORMING OF THE OPTICAL BEAM WITH THE ROTATING POLARIZATION VECTOR

A method for the optical beam production with the rotating polarization vector based on the interference of two beams with the circular polarizations is proposed. The frequency shift between beams is implemented by means of acousto-optic (AO) diffraction. The method is used for the amplitude light modulation with the frequency n_f where f is acoustic frequency and n is integer. AO modulators are fabricated from paratellurite crystal. Modulators allow modulating the optical radiation with wavelength of 0.63 mcm at the quadruple frequency of the acoustic wave. The modulation frequency achieves 180 MHz.

Одним из важных свойств акустооптического (АО) взаимодействия является простота получения сдвига частоты оптического сигнала на частоту звука, являющийся результатом отражения света от бегущей акустической решетки. Это нашло широкое применение для решения задач оптического гетеродинирования, в лазерной доплеровской анемометрии и т.д. В ряде наших работ [1-5] эффект сдвига частоты в процессе АО взаимодействия, используемый для амплитудной модуляции оптического излучения, предложен в нескольких вариантах: при сложении двух циркулярно-поляризованных волн, одна из которых

сдвинута на частоту звука; в режиме поляризационно-независимой дифракции; в режиме каскадного накопления сдвига частоты. Во всех случаях формируется луч с вращающимся вектором поляризации, при этом частота вращения определяется частотой звуковой волны. Такое излучение после прохождения его через поляризатор регистрируется фотодетектором в виде электрического сигнала заданной частоты, связанной с частотой звука. На рис. 1 приведена фотография с экрана осциллографа, где регистрируется сигнал вращения вектора поляризации на учетверенной частоте звука.

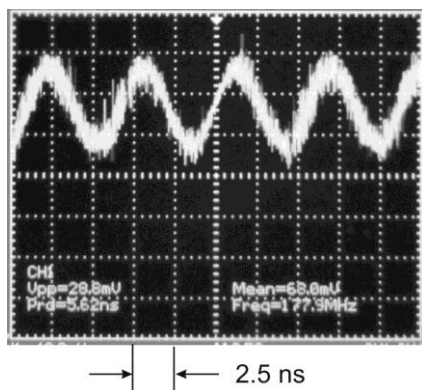


Рис. 1. Фотография электрического сигнала, снимаемого с фотоприемника

Список литературы

1. Котов В.М., Аверин С.В., Шкердин Г.Н. Акустооптическая модуляция света на удвоенной звуковой частоте // Квантовая электроника. 2016. Т.46. №2. С.179-180.
2. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. Акустооптическое преобразование частотного сдвига оптического излучения в амплитудно-модулированный сигнал // Прикладная физика. 2016. №3. С.65-68.
3. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В., Воронко А.И., Тихомиров С.А. Акустооптический модулятор с вращающимся вектором поляризации на основе гиротропного кристалла // КЭ. 2017. Т.47. №2. С.135-139.
4. Котов В.М., Аверин С.В., Котов Е.В. Акустооптический модулятор оптического излучения на удвоенной звуковой частоте // ПТЭ. 2017. №2. С.94-96.
5. Котов В.М., Котов Е.В. Использование акустооптической ячейки из гиротропного кристалла для амплитудной модуляции оптического сигнала // Оптический журнал. 2017. Т.84. В.6. С.51-53.

Е.А. ЛАВРОВ, М.М. МАЗУР, В.С. ШИРЯЕВ¹, Г.Е. СНОПАТИН¹

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,
Нижний Новгород*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ХАЛЬКОГЕНИДНОМ СТЕКЛЕ As_2S_3

Приведены результаты исследования затухания ультразвука в халькогенидном стекле As_2S_3 высокого оптического качества. Показан диапазон частот, при котором возможно применение стекла As_2S_3 в качестве материала акустооптических модуляторов и частотосдвигателей.

E.A. LAVROV, M.M. MAZUR, V.S. SHIRYAEV¹, G.E. SNOPATIN¹

*Russian Research Institute of Physical, Technical and Radiotechnical Measurements,
Mendeleevo, Moscow region*

¹*G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod*

RESEARCH ULTRASOUND ATTENUATION IN As_2S_3 CHALCOGENIDE GLASS

The results of study of ultrasound attenuation in the As_2S_3 chalcogenide glass of high optical quality are represented. The frequency range, in which the use of glassy As_2S_3 as material for acousto-optic modulators and frequency drivers is possible, is shown.

Использовать в качестве материала ячейки акустооптического частотосдвигателя (АОЧС) халькогенидное стекло нам представлялось очень заманчивым, т.к. акустооптическое качество этих материалов по литературным данным [1, 2] очень высокое. Для успешного применения материала в качестве ячейки АОЧС необходимы хорошие оптические характеристики материала и малое затухание ультразвука. Высокочистое стекло состава As_2S_3 получали в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН методом сплавления особо чистых моносulfидов мышьяка и серы в вакуумированной кварцевой ампуле [3]. Исследование образца sulfидов мышьяка методами лазерной масс-спектрометрии, ИК-спектроскопии и лазерной ультрамикроскопии показало предельно низкое содержание растворенных примесей и высокую оптическую однородность.

В литературе [2] значения коэффициента затухания упругих волн экстраполированы на частоту 1 ГГц в предположении квадратичной зависимости коэффициента затухания α от частоты f и не указана частота, на которой проводились измерения. Наши исследования показали, что затухание ультразвука в стекле As_2S_3 происходит по линейному закону (рис. 1). Затухание ультразвука мы измеряли путем регистрации эффективности АО дифракции при распространении ультразвукового импульса в образце стекла As_2S_3 .

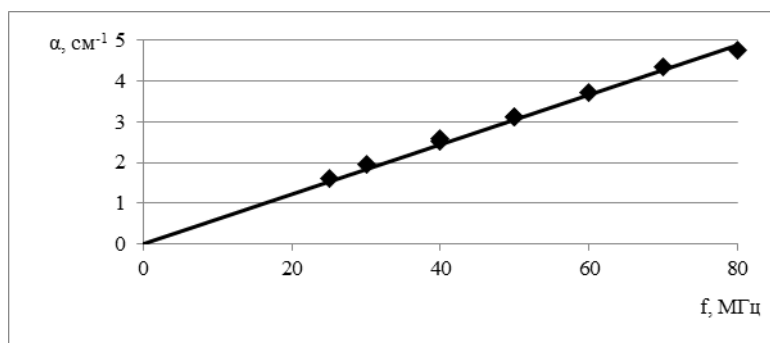


Рис. 1. Зависимость затухания ультразвука от частоты в стекле As_2S_3 , квадраты - экспериментальные точки, линия - линейная экстраполяция

Исследованное стекло As_2S_3 возможно применять в качестве материала АО модуляторов и частотосдвигателей при использовании частот не выше 25-30 МГц. Затухание ультразвуковой волны на частоте 30 МГц на апертуре светового пучка 2 мм будет около 16 %, на частоте 20 МГц около 10 %. Что вполне приемлемо с точки зрения работоспособности такого устройства.

Управляющая ВЧ мощность, необходимая для АОМ, на стекле As_2S_3 будет примерно в 10 раз меньше, чем управляющая мощность для АОМ на кристалле TeO_2 в режиме изотропной дифракции.

Список литературы

1. Dixon R.W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic lights modulators and scanners // J. Appl. Phys. 1967. V.38. №13. P.5149-5153.
2. Uchida N., Niizeki N. Acoustooptic deflection materials and techniques // Proc. IEEE. 1973. V.61. №8. P.1073-1092.
3. Churbanov M.F., Snopatin G.E., Shiryayev V.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Recent advances in preparation of high-purity glasses based on arsenic chalcogenides for fiber optics // Journal of Non-Crystalline Solids. 2011. V.357. P.2352-2357.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ЭФФЕКТ ВОЗОБНОВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

Продемонстрирована возможность удаленной фокусировки света в среде с градиентным профилем показателя преломления вследствие эффекта возобновления, обусловленного интерференцией мод волновода. Показано, что сильно сфокусированный пучок света может быть эффективно передан по оптическому волноводу на большие расстояния с периодом возобновления.

N.I. PETROV

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

REVIVAL EFFECT IN OPTICAL WAVEGUIDES

Remote focusing of light via mode interference in optical waveguide is demonstrated using exact solutions of wave equation. The possibility of super-resolution image transfer through the graded-index optical waveguide due to the large-scale revival effect is shown.

Для получения изображений высокого разрешения требуются системы с большой числовой апертурой NA . Это означает, что пятно фокусировки будет располагаться вблизи линзы. Однако имеются обстоятельства, когда сфокусированный пучок света необходим на удаленных расстояниях от фокусирующей системы. Недавно были рассмотрены методы создания субволновых пятен в дальней зоне [1].

В настоящей работе теоретически продемонстрирована возможность удаленной фокусировки света в среде с градиентным профилем показателя преломления вследствие эффекта возобновления [2, 3], обусловленного интерференцией мод волновода. Показано, что сильно сфокусированный пучок света может быть эффективно передан по оптическому волноводу на большие расстояния с периодом возобновления. Обнаружен эффект периодического возобновления сильно-сфокусированного волнового пакета на больших расстояниях при распространении в градиентной среде, аналогичный эффекту возобновления волновых пакетов в ридберговских атомах.

На рис. 1 представлены распределения интенсивностей трех сильно сфокусированных пучков, смещенных друг относительно друга в поперечной плоскости, при различных расстояниях z .

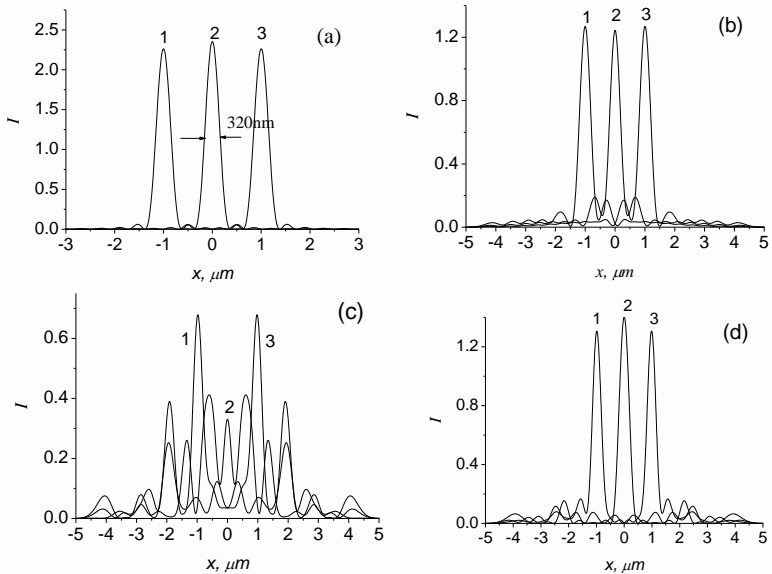


Рис. 1. Распределения интенсивностей осевого и смещенных пучков в волноводе с $\omega = 0.2 \mu \text{ м}^{-1}$ и $NA = 1$ при $z = 0$ (a), $z = 44.1$ мм (b), $z = 10$ мм (c) и $z = 182.7$ мм (d)

Исследовано непараксиальное распространение векторных волновых пучков Лагерра-Гаусса в градиентных световодах с учетом спин-орбитального взаимодействия [4, 5]. Показано, что сильно сфокусированный пучок света может быть эффективно передан по оптическому волноводу на большие расстояния.

Полученные результаты представляют интерес в биологии и медицине, оптической записи информации и микроскопии, и могут быть применены при разработке различных устройств, таких как новые эндоскопы, сенсоры, дисплеи и т.д.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-19-01461).

Список литературы

1. Rogers E.T.F., Zheludev N.I. // J. Opt. 2013. V.15. P.094008.
2. Petrov N.I. // Phys. Rev. A. 2014. V.90. P.043814.
3. Petrov N.I. // Laser Physics Letters. 2016. V.13. P.015101.
4. Petrov N.I. // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V.33. P.1363-1369.
5. Petrov N.I. // Super-resolution imaging in optical waveguide. Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS). Washington, USA, 2017. P. JTu2A.35.

М.А. МАЗИН, В.Д. ПАРАНИН

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ РАЗНОСТИ ХОДА
ГРАДИЕНТНОЙ ЛИНЗЫ НА ОСНОВЕ
АСТИГМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
БЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ**

Апробирован метод исследования оптической разности хода механически свободных градиентных параболических линз на основе астигматического преобразования пучка Бесселя 0-го порядка. На примере четвертьволновой линзы экспериментально показана возможность надежного измерения оптической разности хода не хуже $0,05\lambda_0$. Подтверждено существенное отличие двулучепреломления градиентных оптических линз в центральной и краевой областях.

M.A. MAZIN, V.D. PARANIN

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev

**INVESTIGATION OF DOUBLE REFRACTION OF OPTICAL
PATH DIFFERENCE THE GRADIENT LENS ON THE BASIS
OF ASTIGMATIC TRANSFORMATION OF BESSEL BEAMS**

The method of experimental investigation has been used to test a birefringence of mechanically free gradient parabolic lenses. Method based on the astigmatic transformation of the 0-order Bessel beam. An example of a quarter-wave lens has shown experimentally the possibility of reliable measurement of the optical path difference $\sim 0.05\lambda_0$. Significant difference of birefringence of gradient lenses in the central and edge regions has demonstrated.

Градиентные линзы (граданы) — оптические элементы с заданным радиальным распределением показателя преломления. В настоящее время граданы применяются в системах световодной связи, передачи информации, в области передачи и формирования изображений [1].

Одной из проблем волоконно-оптических информационно-измерительных систем является паразитное двулучепреломление составляющих оптических элементов, изменяющее поляризацию излучения и характеристики волоконных датчиков. Существующие методы измерения двулучепреломления либо обладают невысокой

точностью, либо требуют дорогостоящего обеспечения. В работе предложен новый метод исследования двулучепреломления [2-6].

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она содержит гелий-неоновый лазер, пространственный фильтр – расширитель пучка, четвертьволновую пластину $\lambda/4$, дифракционный аксикон, четвертьволновую градиентную линзу (градан), изображающий микрообъектив, ПЗС-матрицу.

На рис. 2 показаны выходные пучки на различных расстояниях l между микрообъективом и выходной поверхностью градана. Все изображения на рис. 2 имеют одинаковые линейные размеры.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

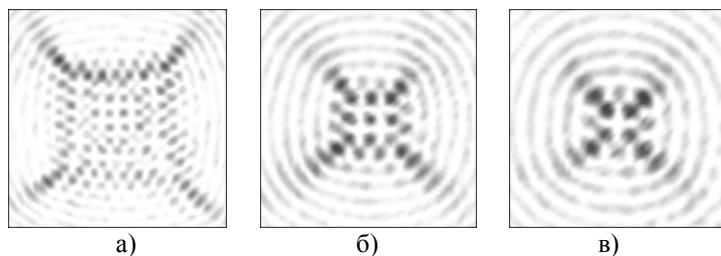


Рис. 2. Выходные пучки при различных расстояниях «микрообъектив-градан»: $l = 4$ мм (а); $l = 4,75$ мм (б); $l = 5,50$ мм (в)

Рассмотренный подход сохраняет все достоинства бесконтактных оптических методов измерения, обладает экспрессностью и не требует дорогостоящего обеспечения. Повышение чувствительности метода к двулучепреломлению образца заключается в увеличении углов падения оптического излучения. Это достигается простым уменьшением пространственного периода дифракционного аксикона.

Список литературы

1. Alferov S.V., Khonina S.N., Karpeev S.V., // JOSA A. 2014. V.31 (4). P.244.
2. Khonina S.N., Parani V.D., et. al. // Computer Optics. 2014. V.38 (4). P.598-605.
3. Khonina S.N., Parani V.D., et al. // Optica Applicata. 2016. V.46 (1). P.5-18.
4. Parani V.D., Khonina S.N. // Proc. of SPIE. 2017. 10342: 1034216.
5. Khonina S.N., et. al. // J. Mod. Opt. 2004. V.51 (5). P.677-86.
6. Parani V.D. // Computer Optics. 2016. V.40 (4). P.594-9.

С.Б. БЫЧКОВ¹, И.В. ВОЛКОВ^{1,2}, Н.П. ХАТЫРЕВ¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва*

²*Московский технологический университет (МИРЭА)*

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Предложена и исследована методика измерений быстродействия и амплитудно-частотных характеристик оптоэлектронных преобразователей на основании их импульсных характеристик. Описана установка, позволяющая получать импульсные характеристики, представлены результаты измерений.

S.B. BUCHKOV¹, I.V. VOLKOV^{1,2}, N.P. KHATYREV¹

¹*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow*

²*Moscow Technological University (MIREA)*

TECHNIQUE OF HIGH-SPEED OPTOELECTRONIC TRANSDUCERS PERFORMANCE PARAMETERS MEASUREMENT

Based on optoelectronic transducers impulse response technique for measurements of rise time and bandwidth is proposed and studied. Measurement setup for pulse responses acquisition is described and the appropriate measurement results are represented.

Быстродействующие оптоэлектронные преобразователи (далее ОЭП) находят широчайшее применение во многих областях техники, в том числе, в системах волоконно-оптической связи, лазерной дальнометрии, системах наведения и целеуказания и приложениях радиофоники. Для преобразователей, работающих в таких системах, ключевыми являются параметры быстродействия, а при передаче аналоговых сигналов, крайне важным становятся ещё и параметры амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ОЭП. Так в современных устройствах волоконно-оптической связи оптическое излучение может модулироваться сигналом, находящимся в полосе до 70 ГГц [1].

По действующему сейчас ГОСТ17772-88 [1], быстродействие ОЭП следует определять, как время нарастания переходной характеристики ОЭП между уровнями 0.1 и 0.9 от установившегося значения. Для этого на

вход ОЭП необходимо подать оптическое излучение, имеющее форму прямоугольного импульса длительностью превышающей 5 постоянных времени исследуемого ОЭП. Время нарастания фронта этого импульса должно быть хотя бы на порядок меньше, чем ожидаемое быстродействие ОЭП, что составляет единицы пикосекунд при исследовании ОЭП с полосой пропускания в десятки ГГц. На практике, получить такой оптический импульс крайне сложно, а ещё сложнее проконтролировать его форму.

В рамках этой работы создана методика определения быстродействия ОЭП, основанная на получении его импульсной характеристики (далее - ИХ). На преобразователь подаётся сверхкороткий оптический импульс, который можно приближённо описать дельта-функцией Дирака. В этом случае отклик ОЭП на такой импульс с достаточной точностью представляет собой его ИХ. Основное преимущество данной методики состоит в том, что отсутствуют жёсткие требования к форме импульса. Существенной является только его длительность. Это позволяет, имея источник сверхкоротких оптических импульсов, производить измерения быстродействия ОЭП СВЧ-диапазонов.

Генерация сверхкоротких оптических импульсов осуществлялась с помощью волоконного лазера в режиме самосинхронизации мод. Одно из зеркал резонатора является зеркалом с насыщаемым поглотителем (SESAM). Для стабилизации параметров импульсной последовательности особое внимание уделялось теплоотводу SESAM. На выходе лазера формируется последовательность импульсов оптического излучения на длине волны 1030 нм, длительностью около 3 пс, следующих с частотой 50 МГц. При этом средняя мощность излучения составляет около 1.5 мВт. Для регистрации отклика ОЭП на оптический импульс использовался стробоскопический осциллограф Keysight DCA-X 86100D с модулем N1055, имеющий полосу 50 ГГц. В качестве сигнала синхронизации осциллографа использовался выходной сигнал вспомогательного фотодиода, на который подавалась часть генерируемой последовательности импульсов.

На рис. 1 показана одна из полученных осциллограмм - импульсная характеристика ОЭП (фотодиодного модуля ДФДМШ40-16 российского производства), имеющего полосу не хуже 16 ГГц. На рис. 2 показана переходная характеристика данного ОЭП, полученная из импульсной путём интегрирования по времени. Также были рассчитаны АЧХ путём вычисления преобразования Фурье импульсных характеристик этого и других исследованных ОЭП.

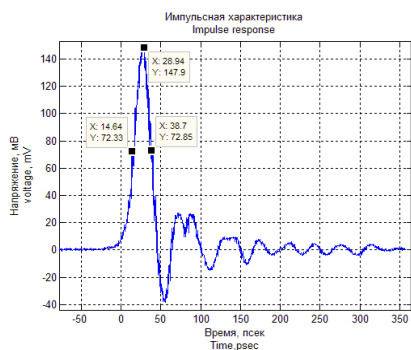


Рис. 1. Импульсная характеристика

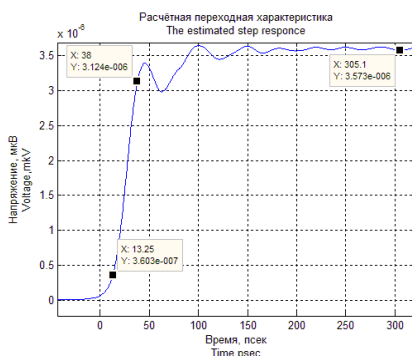


Рис. 2. Расчетная переходная характеристика

Описанный метод при измерениях параметров быстродействия высокоскоростных ОЭП обеспечивает более стабильные и воспроизводимые результаты, чем метод, указанный в [1]. Кроме того, он позволяет измерять параметры АЧХ ОЭП, которые в полосе частот достигающей нескольких десятков гигагерц традиционными методами измерить крайне сложно. Результаты данной работы могут быть положены в основу референтной методики измерений параметров быстродействия и широкополосности современных малоинерционных приемников оптического излучения.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (skr.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения №14.595.21.0003 от 28.08.2017 (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Список литературы

1. ГОСТ 17772-88 СТ СЭВ 3789-82 «Приемники излучения полупроводниковые Фотозлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотозлектрических параметров и определения характеристик», М.: Издательство стандартов, 1988.

А.Н. ДОРОЖКИН^{1,2}, О.Е. НАНИЙ^{1,2}, С.Н. ЛУКИНЫХ^{1,2},
И.И. ШИХАЛИЕВ^{2,3}, Д.Д. СТАРЫХ^{2,3}, В.А. КОНЫШЕВ²,
В.Н. ТРЕЩИКОВ²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
²ООО «Т8», Москва

³Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ РАМАНОВСКИЕ УСИЛИТЕЛИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Разработана методика измерений спектров коэффициента ВКР. На основе данных коэффициентов разработана численная программа по расчету рамановских и гибридных усилителей. Экспериментально продемонстрирована высокая точность расчета мощностей сигнала и накачки в рамановских усилителях.

A.N. DOROZHKIN^{1,2}, O.E. NANIY^{1,2}, S.N. LUKINYKH^{1,2},
I.I. SHIKHALIEV^{2,3}, D.D. STARYKH^{2,3}, V.A. KONYSHEV²,
V.N. TRESHCHIKOV²

¹Lomonosov Moscow State University

²T8 Ltd, Moscow

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

DISTRIBUTED RAMAN AMPLIFIERS IN FIBER OPTIC COMMUNICATION LINES

A technique for measuring the spectra of the SRS coefficient is developed. The numerical program has been developed for the calculation of Raman and hybrid amplifiers based on these coefficients. Experimentally demonstrated high accuracy of calculation of signal power and pumping in Raman amplifiers.

Применение распределенных усилителей на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-усилителей) совместно с традиционными эрбиевыми усилителями позволяет существенно улучшить отношение сигнал-шум в многопролетных и однопролетных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) [1, 2] за счет уменьшения уровня шума усиленного спонтанного излучения и ослабления нелинейных искажений. В последнее время интерес к использованию ВКР-усилителей существенно возрос в связи с началом использования многоуровневых форматов модуляции QAM16, QAM64 и даже QAM256

для работы которых требуется существенно более высокое значение отношения сигнал-шум оптического сигнала.

Для расчета характеристик такого усилителя важнейшим параметром является коэффициент ВКР g_r , определяющийся характеристиками световода, в котором реализуется ВКР-усиление. Нами было проведено экспериментальное исследование по измерению спектральной зависимости рамановских коэффициентов современных телекоммуникационных волокон различными способами. Также был предложен свой упрощенный метод измерения коэффициента ВКР, позволяющий быстро оценить коэффициент ВКР в волокне.

Полученные спектральные зависимости коэффициентов ВКР использовались для расчета спектров усиления и шум-факторов рамановских усилителей с попутной и встречной накачкой.

Известно, что взаимодействие излучений накачки и сигнала в ВКР-усилителе подчиняется системе связанных скоростных дифференциальных уравнений [3]. Данная модель обобщена нами на случай многоволновой накачки и многоканального сигнала, а также учтено влияние собственного шума ASE рамановского усилителя и влияние переменных распределенных точечных затуханий.

Для оценки нелинейных эффектов, возникающих при попутной рамановской накачке, нами использована модель нелинейного шума [4, 5]. В данной модели нелинейные искажения в волокне представляют собой нелинейный шум, зависящий от входной оптической мощности в волокно по закону:

$$P_{NL} = \eta P_{in}^3, \quad (1)$$

где P_{NL} - мощность нелинейного шума, P_{in} – входная мощность в пролет, η – коэффициент нелинейности.

Нами показана применимость разработанной модели к линиям связи не только с экспоненциально затухающим сигналом, но и к линиям с произвольным распределением мощности сигнала. Получены формулы, связывающие коэффициенты нелинейности в линиях без использования и с использованием попутной рамановской накачки.

Список литературы

1. Gainov V.V., et al. // Laser Physics Letters. 2015. V.12. P.066201.
2. Gainov V.V., et al // Technical Physics. 2015. V.60. No.4. P.561-567.
3. Headley C., Agraval G.P. Raman amplification in fiber optical communication systems. London: Elsevier Academic Press, 2005.
4. Carena A., et al. // J. Lightwave Technol. 2012. V.30 (10). P.1524–1539.
5. Konyshhev V.A., et al. // Optics Communications. 2016. V.381. P.352-359.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО УРОВНЯ
БРИЛЛЮЭНОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ
В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ**

В исследовании приведены значения бриллюэновских сдвигов частоты для различных видов оптических волокон при комнатной температуре и отсутствии натяжения. Наличие базы данных профилей спектров рассеяния Манделштама – Бриллюэна волокон различных типов и производителей позволяет классифицировать оптические волокна в оптических кабелях, а также обнаруживать дефектные участки волоконно-оптических линий связи.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**A DETERMINATION OF THE INITIAL LEVEL
OF BRILLOUIN FREQUENCY SHIFT
IN OPTICAL FIBERS OF VARIOUS TYPES**

The values of Brillouin frequency shifts for different types of optical fibers at room temperature and the absence of strain are presented. Having a database of spectra profiles of the Mandelstam – Brillouin scatter of different fibers types and manufacturers allows to classify the optical fibers in the optical cables and to detect problem places of fiber-optic communication lines.

Чтобы обеспечить долговечную работу волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), необходимо устранить продольные механические натяжения (более 0,2 %) в её оптических волокнах (ОВ). Для обнаружения участков ВОЛС с повышенным натяжением ОВ и изменённой температурой применяются бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (ВОТДР) [1–3]. В ВОТДР регистрируется и анализируется распределение спектра рассеяния Манделштама – Бриллюэна (СРМБ) вдоль ОВ. Поскольку при бриллюэновской рефлектометрии уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны, представляет особый интерес исследование СРМБ в ОВ разных производителей с различными законами поведения дисперсии и структурой сердцевины ОВ.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, для разных типов ОВ и разных производителей ОВ, «планки начального

уровня» (f_{B0}) для нормальных условий (при комнатной температуре и при отсутствии механических напряжений) различаются. Для каждой разновидности ОВ следует определить свой «начальный уровень» f_{B0} и коэффициенты для изменения температуры и натяжения ОВ. В табл. 1 приведены значения f_{B0} для всех исследованных разновидностей ОВ (DSF – ОВ со смещённой дисперсией, NZDSF – ОВ с ненулевой смещённой дисперсией, EDF – ОВ, легированное эрбием, «Panda» – разновидность ОВ, сохраняющего состояние поляризации сигнала [1 – 3]).

Таблица 1

Тип ОВ	Значения f_{B0} , ГГц	Рекомендуемое f_{B0} , ГГц
G.652	10,82 ... 10,85	10,84
G.653 (DSF)	10,47 ... 10,49	10,47
G.655 (NZDSF)	10,61 ... 10,64	10,63
G.657	10,77 ... 10,80	10,79
EDF	10,68 ... 10,70	10,70
«Panda»	10,40 ... 10,42	10,41

При использовании для расчетов f_{B0} из таблицы зависимости натяжения от температуры различных ОВ становятся практически идентичными. Для обнаружения участков с изменённой температурой и натяжением желательно иметь эталонную BOTDR-рефлектограмму для исследуемого ОВ при нормальных условиях (при комнатной температуре и при отсутствии механических напряжений). Наличие такой рефлектограммы упрощает своевременное обнаружение «проблемного» участка в ВОЛС, а значит, устранение проблемной ситуации до разрушения волокон ВОЛС. Наличие базы данных профилей СРМБ волокон различных типов и производителей позволяет классифицировать ОВ в ВОЛС, а также обнаруживать дефектные участки [1 – 3].

Практическую ценность представляет также возможность определения структуры и состава слоев, образующих сердечник ОВ, по полученным профилям СРМБ и частотам всех пиков СРМБ, так как введение легирующих веществ и изменение их концентрации влияют на скорость гиперзвука в ОВ и эффективный показатель преломления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып.4 (32). С.74-81.
2. Богачков И.В. // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т.10. №11. С.40-45.
3. Богачков И.В., Горлов Н.И. // Вестник СибГУТИ. 2017. Вып. 2 (38). С.17-25.

А.Е. ЖИТЕЛЕВ^{1,2}, В.А. КОНЬШЕВ², А.В. ЛЕОНОВ²,
С.Н. ЛУКИНЫХ^{1,2}, О.Е. НАНИЙ^{1,2}, В.Н. ТРЕЩИКОВ²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²ООО «Т8», Москва

ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ШУМА ВОЛС ОТ НАКОПЛЕННОЙ ДИСПЕРСИИ

Приведены результаты экспериментов по определению фундаментальных значений коэффициентов нелинейности различных типов оптических волокон, определены зависимости коэффициентов нелинейности от величины накопленной в линии дисперсии для разных типов волокон. Показано, что при больших абсолютных значениях дисперсии значение коэффициента нелинейности асимптотически стремится к константе.

А.Е. JITELEV^{1,2}, V.A. KONYSHCHEV², A.V. LEONOV²,
S.N. LUKINYKH^{1,2}, O.E. NANII^{1,2}, V.N. TRESHCHIKOV²

¹Lomonosov Moscow State University

²T8 Ltd, Moscow

DEPENDENCE OF CAPACITY OF NON-LINEAR INTERFERENCE NOISE OF OFTL FROM ACCUMULATED DISPERSION

Presents the result of experiments on the determination of fundamental values of non-linear coefficients (η) in fibers of various types. The dependencies of η on the value of the dispersion, accumulated in the line, for different fiber types were determined. It is shown that for big absolute values of the dispersion, the value of the nonlinearity coefficient asymptotically tends to a constant.

В ранних оптических системах связи мощность оптических сигналов была сравнительно небольшой, и нелинейными эффектами, возникающими при прохождении сигнала по волокну можно было пренебречь. Со временем требования к оптическим системам связи возрастали – необходимо было постоянно увеличивать скорость передачи сигналов и пропускную способность линии [1]. Начали широко использоваться оптические усилители сигналов и компенсаторы хроматической дисперсии. В результате, мощность сигнала возросла, что усилило влияние нелинейных эффектов на качество связи.

В 2010 году начался переход на когерентные системы связи, в результате чего характер проявления нелинейных эффектов изменился [2]. В работе исследуется характер действия нелинейных эффектов, проявляющихся в виде нелинейного интерференционного шума, который характеризуется через коэффициент нелинейности [3]. Требуется определить, как и от каких параметров (например, дисперсионных) зависит обозначенный коэффициент. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Эксперименты проводились на 100 G транспондере Волга, кодирующем информацию в формате DP-QPSK. Был задействован один канал передачи, в остальных каналах мощность отсутствовала. Блок переменной дисперсии представляет собой набор катушек с волокном и компенсаторов дисперсии, комбинируя которые можно изменять величину накопленной дисперсии с малыми шагами.

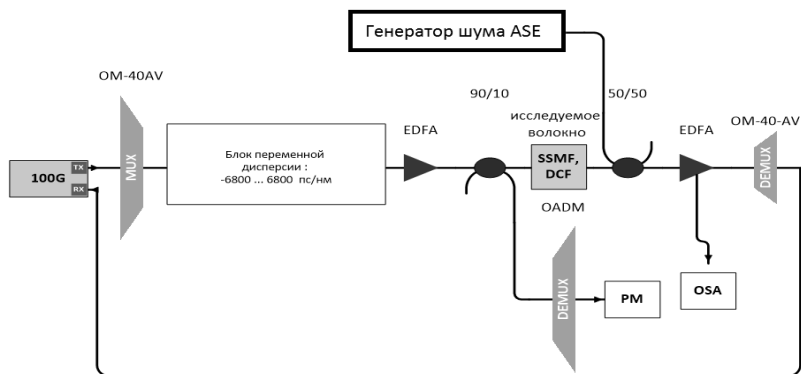


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Гайнов В.В., Гуркин Н.В., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Сверхдлинные однопротёгные линии связи с удалённой накачкой оптических усилителей // Журнал технической физики. 2015. Т.85. Вып.4. С.83-89.
2. Воронин В.Г., Наний О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики : учебное пособие. Университетская книга, 2011.
3. Леонов В.Г., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Нелинейные искажения и нелинейный шум в когерентных системах связи // Фотон-экспресс. 2013.

Д.С. ЗЕМЦОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ,
В.Г. ОСИПОВ, Р.С. СТАРИКОВ, И.Ж. ХАФИЗОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА РАДИОФОТОННОЙ ЛИНИИ X-ДИАПАЗОНА

В работе приведены результаты экспериментов по измерению нелинейных искажений третьего порядка на основе двухтонового теста [1] радиофотонной линии с внешней модуляцией. Проанализированы зависимости выходной мощности на основных частотах и частотах интермодуляции от суммарной мощности входного сигнала. Найдена точка пересечения интермодуляции третьего порядка.

D.S. ZEMTSOV, E.Yu. ZLOKAZOV, V.A. NEBAVSKIY,
V.G. OSIPOV, R.S. STARIKOV, I.Zh. KHAFIZOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASUREMENT OF THIRD ORDER DISTORTIONS OF X-BAND PHOTONIC LINK

Results of experiments on the measurement of third-order nonlinear distortions based on the two-tone test [1] of the microwave photonic line with external modulation are presented. The dependences of the output power on the main frequencies and intermodulation frequencies on the total power of the input signal were analyzed. An intersection point of intermodulation of the third order was found.

Оптические методы обработки сигналов получили большое развитие и предъявляют все большие требования к линеаризации [2, 3]. Одним из критериев точности работы является свободный динамический диапазон. Целью работы является характеристика нелинейных искажений радиофотонной линии. Для этого определялись точки выходной и входной интермодуляции третьего порядка. При этом нелинейные искажения третьего порядка оказываются много больше, чем нелинейные искажения второго порядка [3].

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Основная частота варьировалась от 7 до 11 ГГц (отстройка по частоте составляла 10 МГц). В качестве входной характеристики бралась мощность на выходе сумматора. Мощность на выходе каждого из синтезаторов варьировалась от 8 до 14 dBm. Сигнал регистрировался широкополосным микроволновым PIN фотоприёмником ДФДМШ40-012. Дальнейшая

обработка производилась с помощью осциллографа DSAZ334A. Источником излучения являлся лазер ДМПО155-21. Для управления питанием оптического модуля и поддержания постоянной температуры лазерного диода использовался контроллер тока и температуры КТТ-002. Излучение лазера модулировалось EOspace 1x2 Dual-Output Modulator. Результаты работы представлены на рис. 2 и в табл. 1.

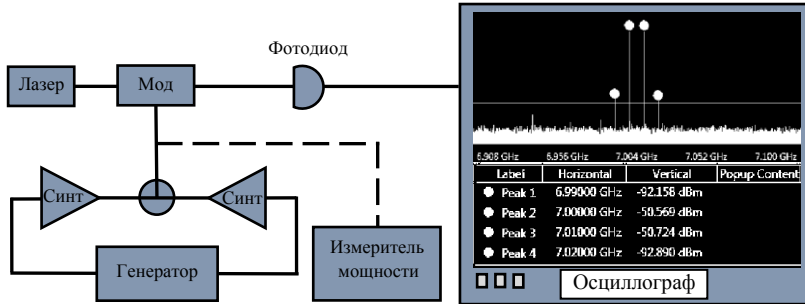


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

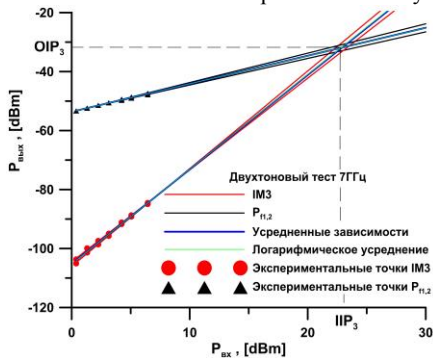


Рис. 2. Зависимость мощности продуктов нелинейных искажений от мощности входного двухтонового сигнала

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе " УМНИК" в рамках договора №10665ГУ/2016 от 24.10.2016.

Список литературы

1. Поляков А.Е. Методика измерения IP_2 и IP_3 двухтонового сигнала // Труды МФТИ. 2012. Т.4. №2. С.54-63.
2. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №2.
3. Urick V.J. Fundamentals of Microwave Photonics. Wiley, 2015.

К.В. ВОХМИНЦЕВ¹, П.А. ЛИНЬКОВ¹, П.С. САМОХВАЛОВ¹,
К. ТАКАЙ³, А.В. ФЕДОРОВ⁴, А.В. БАРАНОВ⁴, И.Р. НАБИЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Университет города Реймса, Шампань-Арденны, Франция

³Университет Хосей, Токио, Япония

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КРУПНОМАСШТАБНЫЙ СИНТЕЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbS

Разработан двухэтапный метод синтеза квантовых точек (КТ) PbS с контролируемым положением максимума полосы люминесценции в интервале 1300-1600 нм. На первом этапе проводят быстрый синтез зародышей КТ PbS, на втором производится дорастивание КТ при меньшей скорости реакции, что обеспечивает возможность более тонкого контроля размера и оптических свойств наночастиц. Разработанный метод адаптирован для получения нескольких грамм КТ за один синтез.

K.V. VOKHMINTSEV¹, P.A. LIN'KOV¹, P.S. SAMOKHVALOV¹,
K. TAKAI³, A.V. FEDOROV⁴, A.V. BARANOV⁴, I.R. NABIEV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

²University of Reims, Champagne-Ardenne, France

³Hosei University, Tokyo, Japan

⁴ITMO University, Saint-Petersburg

LARGE-SCALE SYNTHESIS OF MONODISPERSE PbS QUANTUM DOTS

A two-stage method for the synthesis of PbS quantum dots (QDs) with a controllable position of the maximum of the luminescence band in the interval 1300-1600 nm was developed. In the first stage, PbS nuclei are obtained by rapid growth, while the second stage involves the overgrowth of QDs at a slower reaction rate, which allows fine control over the size and optical properties of the nanoparticles. The developed method can be adapted for obtaining several grams of QDs in one synthesis

Квантовые точки (КТ) – люминесцентные полупроводниковые нанокристаллы, к основным свойствам которых можно отнести широкий спектр поглощения, высокий коэффициент экстинкции и высокую стабильность оптических характеристик во времени [1]. Данные свойства делают КТ перспективным материалом для солнечных батарей [2]. В этой области особого внимания заслуживают КТ PbS, так как они поглощают

свет в видимой, ближней и средней ИК-области, что позволяет более эффективно использовать энергию солнца и увеличить КПД солнечных батарей. С другой стороны, возможность контролировать положение полосы люминесценции путем изменения размера КТ позволит создать ИК-лазеры [3] с настраиваемой длиной волны на их основе.

Особенность формирования КТ PbS состоит в том, что из-за слишком большой скорости образования таких наночастиц не удается контролировать их рост. Это затрудняет получение КТ с заданным положением полосы люминесценции в одну стадию. Для решения этой проблемы мы разработали методику двухстадийного синтеза квантовых точек PbS с заданным положением полосы люминесценции. На первой стадии в раствор олеата свинца в 1-октадецене (ОДЕ) при постоянном перемешивании и температуре 150°C в атмосфере аргона впрыскивают бис(триметилсилил)сульфид (БТМС). Раствор перемешивают в течение 1 минуты, затем реакцию останавливают путем охлаждения до комнатной температуры. В ходе второй стадии происходит дорастивание КТ PbS до заданного размера при более низкой температуре. В синтезированные КТ PbS вносят прекурсор свинца, затем при температуре 100°C, в атмосфере аргона, при помощи шприцевого насоса в реакционную среду вводят раствор БТМС в ОДЕ. Такая постановка реакции позволяет избежать образования новых зародышей PbS, и в то же время получить ансамбль нанокристаллов с узким распределением по размерам. Рост КТ PbS контролируется путем снятия спектров люминесценции; реакцию останавливают при достижении заданной величины. Возможность контроля роста частиц обеспечивается путем снижения скорости реакции дорастивания КТ по сравнению с одностадийным синтезом за счет понижения температуры и понижения концентрации перкурсоров в реакционной среде. В ходе работы данный метод был масштабирован для получения нескольких грамм КТ за один синтез.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы Исследования и Разработки Министерства Образования и Науки Российской Федерации (соглашение № 14.584.21.0032, идентификатор проекта RFMEF158417X0032).

Список литературы

1. Vokhmintcev K.V., Samokhvalov P.S., Nabiev I.R. // NanoToday. 2016. V.11 (2). P.189.
2. Lee H, et. al. // Advanced Functional Material. 2009. V.19 (17). P.2735.
3. Guerreiro P.T., Ten S. // Applied Physics Letters. 1997, V.71, P.1595.

А.Р. ПОМОЗОВ, И.А. КОЛМЫЧЕК, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ЛИНЕЙНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МАССИВОВ НАНОСТЕРЖНЕЙ МЕТАЛЛА В ДИЭЛЕКТРИКЕ

Приведены экспериментальные результаты линейной и нелинейной спектроскопии гиперболического метаматериала на основе массива металлических наностержней (Au, Ag, Ni) в матрице Al_2O_3 . Спектры компонент тензора диэлектрической проницаемости рассчитаны в модели эффективной среды. Методом конечных разностей во временной области выполнено моделирование распределения электромагнитного поля в композитной структуре, получены спектральные зависимости пропускания и отражения метаматериалов, коррелирующие с данными эксперимента.

A.R. POMOZOV, I.A. KOLMYCNEK, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

LINEAR AND NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF HYPERBOLIC PLASMONIC METAMATERIALS

The experimental results of linear and nonlinear spectroscopy of hyperbolic metamaterial based on an array of metal nanorods (Au, Ag, Ni) in the Al_2O_3 matrix are presented. The spectra of the components of the dielectric permittivity tensor are estimated within the effective medium approximation. Spatial distribution of the electromagnetic field in the composite are modeled by finite differences in the time domain method. The corresponding theoretical spectral dependencies of transmission and reflection spectra of metamaterials correlate with the experimental data.

Гиперболические метаматериалы являются объектом активных исследований в последнее время. Они характеризуются гиперболическим законом дисперсии, которая определяется различными по знаку диагональными компонентами тензора диэлектрической и магнитной проницаемости. Одной из простейших реализаций гиперболической среды является массив металлических наностержней в диэлектрической матрице. В таких анизотропных средах появляются новые резонансные особенности, перспективные для создания сенсоров, нелинейных и эмиссионных устройств, и проч. [1, 2]. В данной работе исследованы композитные структуры из массива металлических (Au, Ag, Ni)

наностержней ($\varnothing = 30-60$ нм), полученные методом электрохимического осаждения в матрицу пористого Al_2O_3 [3].

Для таких структур в модели эффективной среды рассчитаны спектры компонент диэлектрической проницаемости, параллельной (ϵ_{\parallel}) и перпендикулярной (ϵ_{\perp}) оси стержней, при разных долях заполнения металлом, ρ ; такие спектры для случая наностержней Au представлены на рис. 1. Видно, что значение $\epsilon_{\parallel} = 0$ (т.н. epsilon near zero) может сильно смещаться в длинноволновую область с ростом ρ . В то же время, в диапазоне 520-600 нм наблюдается рост компоненты ϵ_{\parallel} , что соответствует возбуждению локального плазмона в направлении поперек стержня Au. Такие особенности наблюдались и в эксперименте. На рис. 2 приведены спектры пропускания массива наностержней Au при углах падения $\theta = 0^\circ$ и 45° , и аналогичный рассчитанный спектр для $\theta = 45^\circ$. Минимум пропускания при длине волны 710 нм соответствует возбуждению длинноволновому плазмона. Распределение модуля напряженности ЭМ поля с длиной волны 520 нм для $\theta = 45^\circ$, рассчитанное методом FDTD, представлено на рис. 2, демонстрирующее сильное поглощение в металле и локализацию поля вблизи боковых стенок стержней.

Приведены спектры интенсивности второй оптической гармоники (ВГ) и магнитного эффекта на частоте ВГ в наностержнях на основе никеля.

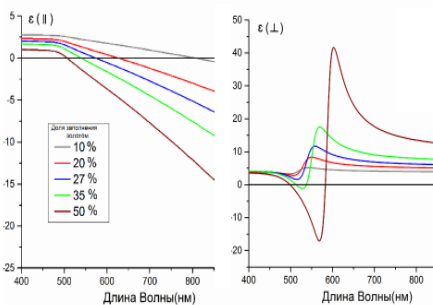


Рис. 1. Зависимость компонент тензора диэлектрической проницаемости ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} при разных долях заполнения Au в Al_2O_3 от длины волны

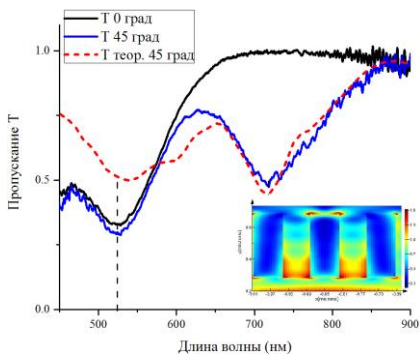


Рис. 2. Спектры пропускания наностержней Au при $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, теоретический спектр при $\theta = 45^\circ$, распределение поля на 520 нм

Список литературы

1. Kirchain R., Kimerling L. // Nature Photonics. 2007. V.1 (6). P.303-305.
2. Yakovlev V. V. et al. // Advanced Materials. 2013. V.25 (16). P.2351.
3. Evans P. et al. // Nanotechnology. 2006. V.17 (23). P. 5746.

С.А. АЛИЕВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Н.С. ТРОФИМОВ,
М.С. КОПЬЕВА, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕЛЬ-ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

В работе были исследованы спектры поглощения пленок диоксида титана, содержащих наночастицы никеля, железа, меди и кобальта, изготовленных по гель технологии. В зависимости от температуры отжига при формировании пленок наблюдались существенные изменения спектров, а именно возникали дополнительные пики поглощения разной интенсивности и сдвиг края зоны пропускания. Эти изменения обусловлены изменением структуры пленок, а также агрегацией наночастиц. Для каждого случая характерно наличие особенных пиков поглощения, отличных от полученных ранее для гелевых пленок с добавлением наночастиц золота [1].

S.A. ALIEV, N.E. NIKOLAEV, N.S. TROFIMOV,
M.S. KOPYEVA, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

OPTICAL PROPERTIES OF GEL TITANIUM DIOXIDE FILMS WITH ADDITION OF METAL NANOPARTICLES

In this article were studied the absorption spectra of titanium dioxide films containing nickel, iron, copper and cobalt nanoparticles made by gel technology. Depending on the annealing temperature, significant changes in the spectra were observed during the formation of the films, namely additional absorption peaks of different intensities and a shift in the edge of the transmission band appeared. These changes are caused apparently by changing the film structure, and the aggregation of nanoparticles. Each case is characterized by the presence of special absorption peaks different from that obtained earlier for gel films with the addition of gold nanoparticles [1].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наночастиц различных металлов на свойства пленок диоксида титана (TiO_2), изготовленных гелевым методом [2], который позволяет получать пленки с содержанием наиболее востребованной для различных применений модификацией анатаза до 100 %.

Получение TiO_2 производилось из тетрабутоксид титана (ТБТ) в присутствии триэтиленгликоля (ТЭГ) и *n*-бутанола. Время синтеза

составляло 3-5 мин, через 2 мин в смесь ТБТ+ТЭГ добавляли н-бутанол. Использовалось соотношение ТБТ:ТЭГ = 1:1. Пленки TiO_2 формировались на подложках для фотопластинок методом вытягивания из раствора и последующего отжига. Образцы были модифицированы наночастицами меди, кобальта, железа и никеля и отжигались при температурах 120 °С и 450 °С.

Исследования оптических свойств пленок TiO_2 были проведены при помощи монохроматора-спектрографа MS 3504I и Банд-лампы СИРШ 6-40, решетка 1200 шт/мм, шаг измерений 1 нм, цветовая температура лампы 2840К. Спектры поглощения представлены на рис. 1.

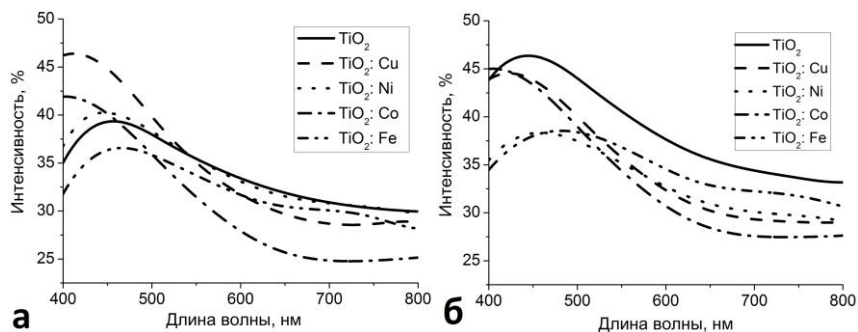


Рис. 1. Спектры поглощения пленок с наночастицами металлов при температуре отжига 120 °С (а) и 450 °С (б)

Наночастицы меди и кобальта увеличили интенсивность поглощения сформированных при температуре 120 °С пленок в коротковолновой части видимого диапазона. При добавлении никеля и железа спектр практически не изменяется. При добавлении наночастиц железа и никеля и отжиге при 450 °С спектр поглощения пленки диоксида титана смещается в видимую область. Сдвиг пика и изменение его ширины, по-видимому, связано с образованием агломератов, а также изменением размера и формы частиц. Более интенсивное поглощение пленки без добавления наночастиц при увеличении температуры отжига говорит нам о присутствии TiO_2 в форме анатаза.

Список литературы

1. Aliev S.A., Nikolaev N.E., Trofimov N.S., Chekhlova T.K. Properties of TiO_2 films with gold nanoparticles // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012036.
2. Evtushenko Yu.M., Romashkin S.V., Trofimov N.S., Chekhlova T.K. Optical Properties of TiO_2 Thin Films // Physics Procedia, 2015. V.73. P.100-107.

С.С. САВИН, А.В. БЕСПАЛОВ, П.Н. НАЙДЕНОВ,
А.А. ГЕРАСЬКИН

Московский технологический университет (МИРЭА)

МЕТОД МНОГОКРАТНОГО ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ-РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ И СУБМИКРОННЫХ НАНОПЛЕНОК ЗОЛОТА

Приведены результаты по улучшению однородности субнанометровых пленок золота на стадии зарождения в условиях многократного ионно-лучевого осаждения-распыления на примере формирования магнитоплазмонных кристаллов. Предложена теоретическая модель, объясняющая полученные результаты по формированию качественных однородных пленок золота на феррит-гранатах с повышенной адгезией и стойкостью к постобработке.

S.S. SAVIN, A.V. BESPALOV, P.N. NAYDENOV, A.A. GERASKIN

Moscow Technological University (MIREA)

METHOD OF MULTIPLE ION-BEAM SPUTTER-DEPOSITION TO IMPROVE THE HOMOGENEITY OF OPTICALLY TRANSPARENT AND SUBMICRONIC GOLD FILMS

The report shows the results on improving the homogeneity of subnanometric gold films at the nucleation stage under conditions of multiple ion-beam sputter-deposition using the example of the synthesis of magnetoplasmonic crystals. A theoretical model is proposed that explains the results obtained for the formation of qualitative homogeneous gold films on iron garnets with enhanced adhesion and post-processing resistance

В настоящее время уделяется внимание интегрированным устройствам магнитооптики, оптоэлектроники и спинтроники на основе гетероструктур с нанесенными на них наноразмерными пленками золота. Примером могут служить оптически прозрачные гетероструктуры на основе феррит-гранатов, с нанесенными на них ультратонкими, до 5 нм, пленками золота, предназначенными для защиты феррит-гранатов от внешних воздействий агрессивных сред или для создания оптически прозрачных контактов [1]. Еще одним примером служат магнитоплазмонные кристаллы, созданные и описанные в работе [2], состоящие из субмикронных пленок феррит-гранатов с нанесенной на них 1D перфорированной нанопленкой золота толщиной 40÷100 нм.

В обоих примерах было важно обеспечить однородность и адгезионную стойкость нанопленок золота, а также создать наиболее узкий интерфейс «пленка-подложка» при минимальной взаимной диффузии. Для решения этих задач предложен трехстадийный метод формирования однородных наноразмерных ультратонких и субнанометровых пленок золота.

На первой стадии на подложку наносят пленку золота толщиной от 2 до 4 нм, распыляя мишень золота пучком ионов кислорода с энергией более 1500. На второй стадии удаляют поверхностный слой пленки золота при распылении пучком ионов кислорода с энергией менее 300 эВ до исчезновения металлической проводимости на поверхности подложки. На третьей стадии повторно наносят пленку золота, дублируя параметры нанесения из первой стадии.

В работе представлена теоретическая модель, объясняющая повышение однородности и адгезионное качество пленки золота, которая основана на предположении, что в приповерхностной области подложки образуются новые центры кластерообразования (рис. 1), которые, в свою очередь создают устойчивую связь золото-золото.

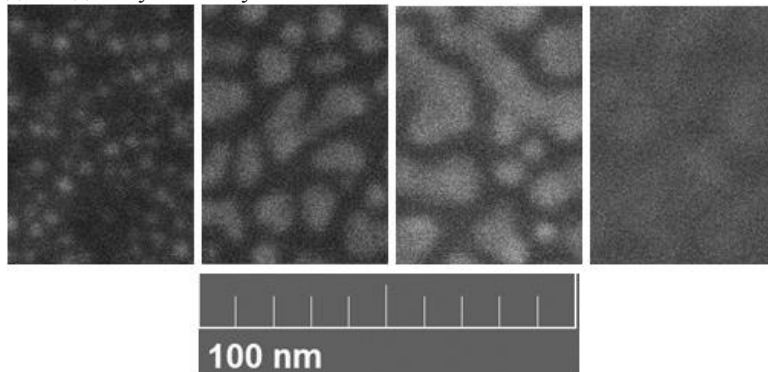


Рис. 1. РЭМ-изображение последовательного роста нанопленки золота 5 нм от центров кластерообразования до их коалесценции в сплошную пленку

Список литературы

1. Стогний А.И., Беспалов А.В., Новицкий Н.Н., Голикова О.Л., Ермаков В.А., Кецо В.А. Оптически прозрачная гетероструктура. Патент на изобретение №2572499.
2. Беспалов А.В., Голикова О.Л., Савин С.С., Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Евдокимов А.А. Формирование кристаллов магноники с наноразмерным периодом островков методом травления фокусированным ионным пучком // Неорганические материалы. 2012. Т.48. №12.
3. Couairon A., Sudrie L., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V.71. P.125435.

А.К. ИВАНОВА^{1,2}, А.А. ИОНИН², С.И. КУДРЯШОВ²,
И.Н. САРАЕВА²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

НАНОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ В ВОДЕ

Абляция наносекундным ИК-лазером, сопровождающаяся образованием плазмы, кремниевой мишени в воде была описана сублинейной зависимостью потери массы при многократном повторении импульсов и функцией третьей степени коэффициента экстинкции, полученных коллоидных растворов, от плотности лазерного излучения. Линейная зависимость указывает на образование плазмы, регулирующей скорость абляции, одновременно с этим быстрый рост коэффициента экстинкции коллоидного кремния размером около 100 нм в ИК-диапазоне от интенсивности предполагает плазменную диссипацию продуктов абляции.

А.К. IVANOVA^{1,2}, А.А. IONIN², S.I. KUDRYASHOV²,
I.N. SARAIEVA²

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

PLASMA-MEDIATED NANOSECOND LASER GENERATION OF Si NANOPARTICLES IN WATER

Plasma-mediated nanosecond IR-laser ablation of Si in water was describe sublinear function mass loss by multi shot ablative and third-power function extinction coefficient of generated colloidal solutions of density laser intensity. The first addiction shows influence subcritical ablative plasma to ablative rate, also fast increase extinction coefficient of 100 nm size particles of silicon in colloidal solution implies plasma-mediated dissociation of the ablation products.

Коллоидные растворы наночастиц, полученные лазерной абляцией, представляют основную форму наноматериалов, которые используются в биомедицине, нанофотонике, материаловедении и других [1]. Высокая интенсивность периодических импульсов лазера позволяет экологично и эффективно получать химически чистые коллоидные растворы различных видов материалов наночастиц [2].

Целью работы является описание механизма образования наночастиц кремния в воде под действием лазерного излучения наносекундных импульсов с частотой повторения 20 кГц, энергией в импульсе до 1 мДж.

Явления, происходящие при увеличении интенсивности лазерного излучения при абляции: 1) поверхностное испарение расплавленного материала вдоль поверхности «расплав-воздух», при котором образуется небольшой конденсат, 2) гомогенное кипение, связанное с изгнанием парогазовой смеси из расплава [3].

Изменяя интенсивность лазерного излучения в пределах 0,4 – 1 мДж и сканируя образец со скоростью 80 мм/с, были получены функции потери массы образца после сканирования (рис. 1) и зависимость коэффициента экстинкции, образованных коллоидных растворов (рис. 2).

Исследуя данные зависимости, предполагается, что лазерная абляция в данном случае сопровождается фазовым взрывом плотного расплавленного материала в воду [4], при этом быстрый рост коэффициента экстинкции указывает на диссоциацию продуктов абляции в образованной плазме.

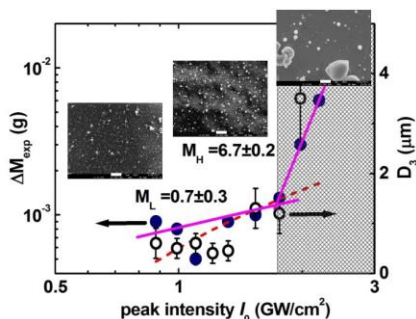


Рис. 1. Зависимость потери массы от плотности интенсивности лазерного излучения

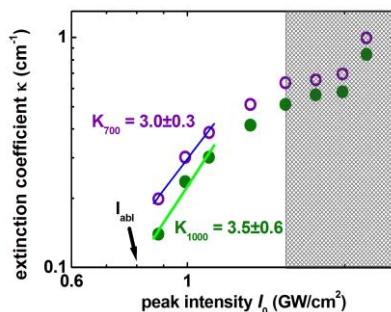


Рис. 2. Зависимость коэффициента экстинкции от плотности интенсивности лазерного излучения

Список литературы

1. Semaltianos N.G. // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2010. V.35. P.105.
2. Streubel R., et. al. // Opt. Lett. 2016. V.41. P.1486.
3. Leveugle E., et al. // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2004. V.79(7). P.1643.
4. Letzel A., et al. // J. Phys. Chem. C. 2017. V.121. P.5356.

А.А. КОЗЛОВ, А.С. АКСЕНОВ, С.Д. АБДУЛЛАЕВ, А.В. ИВАНОВ¹

*Московский технологический университет
(институт тонких химических технологий)*

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В работе приведена модель, описывающая падение эффективности дифракции от поверхности фотонного кристалла после детектирования растворителей материала ФК. Рассмотрены изменения в профиле дифракционной решетки, структуре поверхности составляющих элементов, степени упорядоченности упаковки, вязкоупругих свойств.

A.A. KOZLOV, A.S. AKSENOV, S.D. ABDULLAEV, A.V. IVANOV¹

Moscow Technological University (Institution of Fine Chemical Technology)

¹*Lomonosov Moscow State University*

DEGRADATION MECHANISMS OF SENSORS BASED ON PHOTONIC CRYSTALS

The reduction of the diffraction efficiency from the surface of the photonic crystal (PC) after solvents detection was described. The changes of the surface, the package ordering, the viscosity and mechanical properties of the PC were presented.

Фотонные кристаллы (ФК) являются весьма перспективными структурами для использования в датчиках химических веществ [1]. К основным достоинствам подобных устройств относится компактность, возможность визуального определения содержания аналита по смещению спектральных максимумов диффузного отражения, высокая скорость отклика.

На сегодняшний день отсутствует литература, описывающая причины уменьшения эффективности дифракции вследствие деградации сенсора на основе ФК. Фотография подобного образца, полученная с помощью СЭМ (рис. 1), не показала принципиального изменения структуры ФК. Из-за малого размера элементов ФК, отражающего в видимой области спектра, невозможно отслеживать динамику взаимодействия микросфер с аналитом, поэтому были выбраны модельные упаковки из аналогичных микросфер диаметром 0,95-213 микрометров, различимые с помощью оптического микроскопа. В модельных упаковках многие процессы

протекают идентично ФК (сорбция/десорбция, диффузия аналита, модификация поверхности), в то же время необходимо учитывать, что при масштабировании меняется поверхностный фактор, а также ряд параметров, связанных с размерами объекта: капиллярные силы, участие в броуновском движении и т.п.

Опыты на моделях показали, что при попадании растворителя на образец изменяется профиль дифракционной решетки вследствие набухания микросфер, их реологии и, как следствие, уменьшение эффективной «глубины штриха решетки», что в значительной степени влияет на эффективность дифракции (рис. 2 [2]).

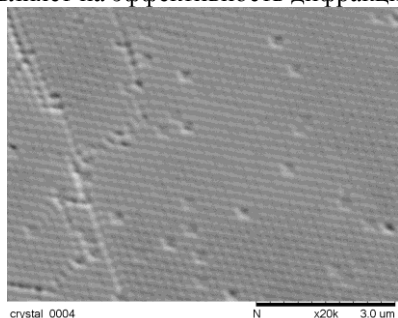


Рис. 1. Поверхность ФК после воздействия растворителя

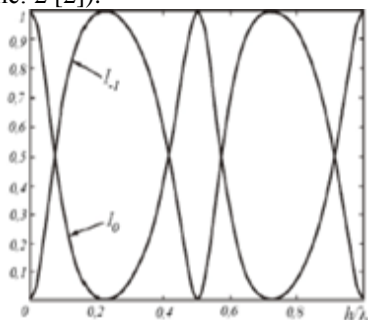


Рис. 2. Зависимость интенсивностей 1-го и 0-го порядков бинарной решетки от глубины штриха для ТМ-поляризации при $d = \lambda$, $\theta = 30^\circ$

Также уменьшение эффективности обусловлено миграцией элементов ФК с нарушением упаковки и рассеянием света от поверхности микросфер после действия аналита. При обратной диффузии растворителя из микросферы из-за уменьшения объема на поверхности микросфер образуются складки с искажением формы. Повторное введение аналита приводит к значительно более быстрому набуханию. Это объясняется переупаковкой полимерных цепей при радиальных потоках растворителя. Цепи, в свою очередь, распрямляются, что увеличивает диаметр сфер по сравнению с исходным. Этот факт играет значительную роль при разработке технологии многоцветного датчика.

Список литературы

1. Fenzl C., Hirsch T., Wolfbeis O.S. Photonic Crystals for Chemical Sensing and Biosensing // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014. V.53. P.3318-3335.
2. Васенин Р.М. Кинетика набухания полимеров // *Высокомолекулярные соединения.* 1964. Т.6. №4. С.624-629.

А.Д. ГАРТМАН, А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, С.Е. СВЯХОВСКИЙ,
Н.В. МИТЕТЕЛО, А.А. КУДРИНСКИЙ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СПЕКТРОСКОПИЯ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КОМПОЗИТНЫХ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КВАРЦА

Продemonстрировано усиление линейного и нелинейного отклика композитных пленок пористого кварца с наночастицами серебра, расположенными на стенках пор, в области плазмонного резонанса наночастиц Ag. Показано, что коэффициент двухфотонного поглощения при этом возрастает более чем в 1.5 раза по сравнению с нерезонансным случаем. Изучены особенности комбинационного рассеяния света в структуре на примере тестового аналита – Rhодамин 6G.

A.D. GARTMAN, A.I. MAYDYKOVSKIY, S.E. SVYAKHOVSKIY,
N.V. MITETELO, A.A. KUDRINSKIY, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

TWO-PHOTON ABSORPTION SPECTROSCOPY IN COMPOSITE PLASMONIC STRUCTURES BASED ON POROUS SILICA

The results of linear and nonlinear optical response in the structure based on porous silica with silver nanoparticles in the pores are shown. Nonlinear absorption coefficient spectrum is analyzed in comparison with the linear absorption spectrum. The main particular properties of Raman scattering of light in the structure are studied when using the test analyte Rhodamin 6G.

В данной работе представлен новый тип композитных сред со сквозными порами порядка нескольких десятков нанометров, на стенках которых расположены плазмонные наночастицы серебра. Такой подход позволяет перейти от использования плоских рамановских подложек к объемным [1], в которых эффективность преобразования света в излучение на рамановских частотах усилена за счет увеличения области взаимодействия излучения накачки со структурой. Ранее было показано, что в случае 2D подложек с наночастицами серебра возрастание сечения комбинационного рассеяния (КР) может достигать 10^9 [2] в зависимости от дизайна используемой подложки.

В эксперименте заполнение структуры из пористого кварца (толщиной 200 мкм) наночастицами серебра проводилось методом вакуумной инфузии из водного раствора с концентрацией наночастиц 500 мкг/мл, дисперсия размеров которых составляла 5-20 нм. Объемная доля наночастиц Ag в порах композита составила $1,7 \times 10^{-6}$.

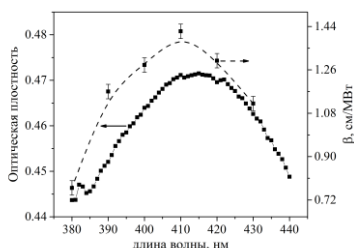


Рис. 1. Спектры оптической плотности (левая шкала) и коэффициента двухфотонного поглощения (правая шкала), на половине длины волны накачки, для композитной структуры

На рис. 1 представлены спектры оптической плотности и коэффициента двухфотонного поглощения (β), измеренного методом безапертурного Z-сканирования [3]. Для двухфотонного поглощения длина волны на рис. 1 соответствует половине длины волны падающего на структуру излучения титан-сапфирового лазера с длительностью импульса 80 фс, интенсивность накачки составляла 4.2 МВт/см^2 . Видно, что максимальное поглощение в линейном и нелинейном случаях приходится на диапазон 410-415 нм, при этом величина нелинейного поглощения достигает 1.4 см/МВт , т.е. более чем в 1.5 раза больше по сравнению с нерезонансным случаем. Данный эффект обусловлен резонансным возбуждением локальных поверхностных плазмонов в наночастицах металла и соответствующим усилением локального поля вблизи плазмонных частиц. Таким образом, данные композитные металл-диэлектрические структуры является перспективными для применения в качестве плазмонно-активных сред.

Список литературы

1. Wang D., Zhu W., Best M.D., Camden J.P. Wafer-scale metasurface for total power absorption, local field enhancement and single molecule Raman spectroscopy // Scientific reports. 2013.
2. Bouhelier A., Beversluis M., Hartschuh A., Novotny L. Near-field second-harmonic generation induced by local field enhancement // Physical Review Letters. 2003. V.90. P.013903.
3. Sheik-Bahae M., Said A.A., Wei T.H., Van Stryland E. W. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. V.26(4).

П.Н. НАЙДЕНОВ, О.Л. ГОЛИКОВА, С.С. САВИН,
А.Л. ЧЕХОВ¹, А.В. БЕСПАЛОВ

Московский технологический университет (МИРЭА)

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

СИНТЕЗ СИММЕТРИЧНЫХ 1D МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ КОМБИНИРОВАНИЕМ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ

Анализируются структурные особенности полученных симметричных магнитоплазмонных кристаллов (МПК) с капсулированными плазмонными решетками золота, описаны их оптические и магнитооптические свойства. Показано, что в симметричной МПК структуре наблюдаются резонансы с более высокой добротностью, чем в исходных МПК.

P.N. NAYDENOV, O.L. GOLIKOVA, S.S. SAVIN,
A.L. CHEHOV¹, A.V. BESPALOV

Moscow Technological University (MIREA)

¹*Lomonosov Moscow State University*

SYNTHESIS OF SYMMETRIC 1D MAGNETOPLASMIC CRYSTALS $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ BY COMBINING ION-BEAM TECHNIQUES

The paper analyzes the structural features of the resulting symmetric magnetoplasmonic crystals (MPC) with encapsulated plasmon gold gratings, describes their optical and magneto-optical properties. It is shown that resonances with a higher Q-factor are observed in a symmetric MPC structure than in the initial MPC.

Висмутовые феррит-гранаты (BIG) долгое время являлись основным материалом для магнитооптической (МО) записи. В то же время, относительная малость МО эффектов является препятствием для использования пленок BIG в интегральных устройствах магнитной микроэлектроники [1]. Для усиления МО эффектов было предложено использовать магнитоплазмонные кристаллы (МПК), в которых реализуется резонансное усиление электромагнитного поля при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в периодической решетке золота на поверхности магнитной пленки [2]. В работе выполнены экспериментальные и теоретические исследования МПК, полученных комбинированным применением фокусированного

высокоэнергетического и широкоапертурного низкоэнергетического ионных пучков в процессах осаждения-травления [3, 4].

Целью работы является синтез магнитоплазмонных кристаллов нового симметричного типа, $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, в которых описанные выше МПК служат исходными структурами. Это реализуется путем формирования дополнительного поверхностного слоя BIG (состава $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) в результате его конформного осаждения при ионном распылении мишени соответствующего состава и последующей кристаллизации в процессе отжига. Основные усилия были направлены на оптимизацию условий синтеза капсулирующей пленки граната, позволяющих сохранить свойства исходного МПК, и достижение плотной поликристаллической структуры дополнительного слоя BIG, «наследующей» свойства соответствующей эпитаксиальной пленки-аналога. Ожидалось, что в этом случае потери в структуре будут ниже, что приведет к большей добротности резонансно возбуждаемых ППП. Кроме того, плазмонная решетка в таких симметричных МПК (рис. 1) будет защищена от механических повреждений и воздействий атмосферы.

Представлены результаты экспериментов с образцами, полученными на исходных пленках составов BIG и $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ (BTIG). Латеральные размеры МПК были не более 100 мкм x 200 мкм, параметры 1D плазмонной решетки составляли, в основном, 400..700 нм (период) x 80..100 нм, исходная высота слоя золота не превышала 80 нм.

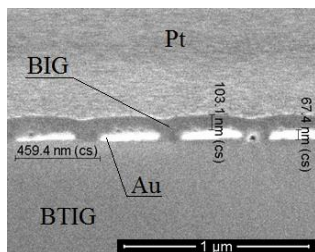


Рис. 1. СЭМ изображение среза симметричного МПК состава $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Au}/(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$

Список литературы

1. Zvezdin A.K., Kotov V.A. Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials. Taylor&Francis, NY, 1997.
2. Belotelov V.I., Akimov I.A., Pohl M., et al., // Nature Nanotechnology. 2011. V.6. P.370.
3. Bepalov A.V., Golikova O.L., Savin S.S., Stognij A.I., Novitskii N.N. // Inorganic Materials. 2012. V.48(12). P.1190.
4. Chekhov A.L., Krutyanskiy V.L., Ketsko V.A., Stognij A.I., Murzina T.V. // Optical Materials Express. 2015. V.5. P.1647.

А.И. ШУГУРОВ, С.Б. БОДРОВ,
Е.А. МАШКОВИЧ, М.И. БАКУНОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

НЕЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ СТРОБИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В GaAs

Экспериментально продемонстрирован метод неэллипсометрического измерения временной формы терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в кристалле GaAs. Метод основан на модуляции интенсивности лазерного импульса при его нелинейном взаимодействии с терагерцовой волной в условиях неколлинеарного распространения в электрооптическом кристалле. Проведено сравнение данного метода со стандартным эллипсометрическим.

A.I. SHUGUROV, S.B. BODROV,
E.A. MASHKOVICH, M.I. BAKUNOV

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

NON-ELLIPSOMETRIC ELECTRO-OPTIC SAMPLING OF TERAHERTZ PULSES IN GaAs

We demonstrate experimentally non-ellipsometric electro-optic sampling of terahertz waves by femtosecond laser pulses in GaAs. The technique is based on modulation of the laser pulse intensity that results from nonlinear interaction of the laser pulse with noncollinearly propagating terahertz wave. The results are compared with the ones obtained by the standard ellipsometric electro-optic sampling method.

Электрооптическое стробирование терагерцовых (ТГц) полей фемтосекундными лазерными импульсами – стандартный метод измерения временной формы терагерцовых волн. В основе метода лежит изменение поляризации оптического импульса вследствие эффекта Пококельса при совместном распространении оптического и ТГц импульсов в электрооптическом кристалле. Недавно в работе [1] был экспериментально продемонстрирован новый (неэллипсометрический) метод электрооптического стробирования, в котором регистрируются изменения не поляризации, а интенсивности пробного оптического пучка, что позволяет обходиться без поляризационной оптики и, в принципе, без балансного детектора. Модуляция оптической интенсивности возникает при неколлинеарном распространении оптического и ТГц импульсов вследствие углового разделения процессов нелинейной генерации

суммарной (ГСЧ) и разностной (ГРЧ) частот (при коллинеарном распространении процессы ГСЧ и ГРЧ компенсируют друг друга) [2]. В работе [1] использовался кристалл LiNbO_3 , в котором синхронизм оптического и ТГц импульсов достигается при большом ($\sim 63^\circ$) угле неколлинеарности, что требует ввода ТГц импульса внутрь кристалла через специальную кремниевую призму. В данной работе мы демонстрируем возможность реализации неэллипсометрического метода в кристалле GaAs с небольшим ($\sim 13^\circ$) углом синхронизма, что позволяет отказаться от согласующей призмы.

Эксперименты проводились на установке, подобной той, что описана в работе [3], но с удаленными поляризационными элементами после кристалла детектора GaAs [110]. Поляризации оптического и ТГц пучков выбирались такими, чтобы обеспечить максимальную модуляцию оптической интенсивности – поперек и вдоль оси (001) соответственно.

На рис. 1 показана измеренная осциллограмма ТГц импульса, а на рис. 2 – соответствующий спектр. Для сравнения на рис. 2 показан также спектр, полученный эллипсометрическим методом в том же кристалле. Видно, что спектр неэллипсометрического сигнала смещен в высокочастотную область. Используя развитую в работе [1] теорию, это можно объяснить острой фокусировкой пробного оптического пучка.

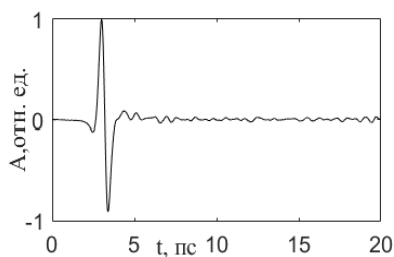


Рис. 1. Осциллограмма ТГц импульса

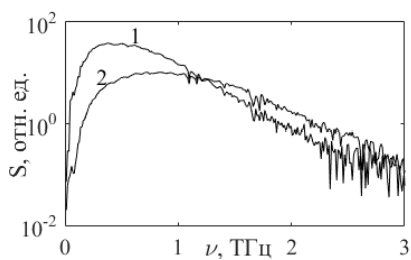


Рис. 2. Амплитудные спектры:

- 1 – эллипсометрический метод,
2 – неэллипсометрический метод

Список литературы

1. Tani M. et al. // Opt. Express. 2013. V.21. P.9277.
2. Bakunov M.I., Gorelov S.D., Tani M. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2016. V.6. P.473-479.
3. Mashkovich E.A., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. V.5. P.732-736.

И.А. ГЛИНСКИЙ^{1,2}, Д.С. ПОНОМАРЕВ¹, Р.А. ХАБИБУЛЛИН¹,
А.Э. ЯЧМЕНЕВ¹

¹*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва*

²*Московский технологический университет (МИРЭА)*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕННАХ НА ОСНОВЕ $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$

Проведено исследование интегральной эффективности оптико-ТГц конверсии в зависимости от параметров фотопроводящего материала ($\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$) при оптической накачке лазером с длиной волны 800 и 1030 нм изготовленных в ИСВЧПЭ РАН фотопроводящих антенн (ФА). Для каждой из ФА были аналитически рассчитаны значения наведенного ТГц фототока и интегральной эффективности оптико-ТГц конверсии. С помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФА и оценена мощность джоулева разогрева активной области антенны.

I.A. GLINSKIY^{1,2}, D.S. PONOMAREV¹, R.A. KHABIBULLIN¹,
A.E. YACHMENEV¹

¹*Institute of Ultra-High-Frequency Semiconductor Electronics of the RAS, Moscow*

²*Moscow Technological University (MIREA)*

EVALUATION EFFICIENCY CONVERSION FEMTOSECOND OPTICAL PULSES TO TERAHERTZ RADIATION IN PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS BASED ON $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$

The total efficiency of the optical-terahertz conversion η_{total} in photoconductive antennas (PCA) fabrication in IUHFSE RAS and based on $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ under optical laser excitation at wavelengths of 800 and 1030 nm is studied. For each of the PCA, the values of the induced THz photocurrent and the integrated conversion coefficient of the optical THz were analytically calculated. With the use of electromagentic modeling, the processes of heat transfer are studied and the power of Joule heating in these PCA is evaluated.

Фотопроводящие антенны (ФА) являются одними из наиболее используемых оптоэлектронных источников широкополосного терагерцового (ТГц) излучения (0.1-6 ТГц) [1, 2]. Они генерируют

ультракороткие ТГц импульсы с высокой пиковой мощностью при комнатной температуре, и не требуют применения мощных лазеров для оптической накачки. Это позволяет использовать ФА в системах ТГц спектроскопии и визуализации для медицинских исследований, анализа биологических объектов, идентификации взрывчатых и вредных веществ и т.д. [1,2]. Несмотря на достигнутые успехи в области инженерии ФА эффективность преобразования лазерного излучения в генерируемое ТГц, другими словами, эффективность оптико-ТГц конверсии, в настоящее время остается невысокой (10^{-6} - 10^{-4}) [1-3].

Была исследована интегральная эффективность оптико-терагерцовой конверсии η_{total} в фотопроводящих антеннах (ФА) на основе $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ при оптической накачке фемтосекундным лазером с длиной волны 800 и 1030 нм [3]. Показано, что определяющее как на величину ТГц фототока, так и на значение η_{total} оказывают свойства фотопроводящего материала $\mu\text{т}^2$, величина прикладываемого напряжения и расстояние между контактами ФА.

Для проведения электромагнитного моделирования исследуемых ФА на основе LT GaAs и $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ методом конечных элементов под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов была построена модель ФА на основе экспериментально измеренных ВАХ антенн [4]. Результаты моделирования показали, что степень перегрева $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ ФА превосходит аналогичную величину для LT GaAs ФА. Использование теплоотвода позволяет уменьшить рабочую температуру антенны на 16 % для ФА на основе LT GaAs и на 30 % для ФА на основе $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$, тем самым частично компенсировав негативное влияние темнового тока.

Список литературы

1. Burford N.M., El-Shenawee M.O. // Opt. Eng. 2017. V.56. №1. P.010901.
2. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. // Laser Photonics Rev. 2017. V.11. №1.
3. Глинский И.А., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С. // Микроэлектроника. 2017. Т.46. №6. С.443-449.
4. Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А., Ячменев А.Э., Павлов А.Ю., Слаповский Д.Н., Глинский И.А., Лаврухин Д.В., Рубан О.А., Мальцев П.П. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т.51. №9. С.1267-1272.

Д.И. ХУСЯИНОВ

Московский технологический университет (МИРЭА)

**ДИНАМИКА ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ
ЗАРЯДА В ПЛЕНКАХ ТВЕРДОГО РАСТВОРА InGaAs
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН НАКАЧКИ**

В работе представлены экспериментальные результаты, полученные методом оптической «накачки-зондирования» на отражения в тонкой пленке твердого раствора InGaAs , при длине волны излучения фемтосекундного лазерного источника от 750-1000 нм. Проведена аппроксимация полученных результатов и получены временные релаксационные константы, характеризующие динамику фотозвужденных носителей.

D.I. KHUSYAINOV

Moscow Technological University (MIREA)

**PHOTOGENERATED CARRIER DYNAMICS IN THIN FILM
OF A SOLID SOLUTION InGaAs AT DIFFERENT
WAVELENGTHS OF THE PUMP PULSE**

The paper presents experimental results obtained by the optical transient reflectivity "pump-probe" method in a thin film of an InGaAs solid solution at a wavelength of a femtosecond laser source radiation from 750-1000 nm. Approximation of the results and relaxation time constants characterizing the dynamics of photoexcited carriers was obtained.

Последнее десятилетие популярным направлением является поиск материалов для модернизации параметров фотопроводящих терагерцевых (ТГц) антенн [1, 2]. Арсенид индий галлия ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где x это мольная доля индия) в данный момент является распространенным материалом фотопроводящих антенн (ФПА), для лазерной накачки компактными фемтосекундными волоконными лазерами в ближнем инфракрасном диапазоне. Обычно $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ выращивается на подложке фосфида индия для того, чтобы избежать механических напряжений между фотопроводящим эпитаксиальным слоем и подложкой при различиях в постоянных решеток. Фосфид индия является хрупким материалом, плохо пропускает ТГц излучение, а также имеет достаточно высокую стоимость ($\text{InP} \sim 310$ евро, $\text{GaAs} \sim 180$ евро) относительно галлия арсенида, поэтому изготовление фотопроводящего $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs становится

перспективным направлением в развитии ФПА, а также сложной задачей, так как необходимо выбрать правильное значение мольной доли. Для оценки таких структур проводят исследование динамики фотовозбужденных носителей заряда (ФНЗ), поскольку низкое время жизни ФНЗ приводит к широкому спектру ФПА.

Целью данной работы является исследование динамики ФНЗ методом оптической «накачки-зондирования» на отражение для различных длин волн оптической накачки накачки в твердом растворе $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$ на подложке GaAs. Метод «накачки-зондирования» основан на использовании двух импульсов: слабый (зондирования) и сильный (накачка). Импульс накачки возбуждает неравновесные носители заряда, а импульс зондирования детектирует процесс возбуждения и релаксации ФНЗ, благодаря изменению задержки между импульсами. Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 1. Аппроксимация экспериментальных результатов была произведена с помощью двухэкспоненциальной модели [3]:

$$\Delta R(t) = \frac{A}{2} \text{Exp} \left(\frac{w^2}{4+t_1^2} - \frac{t}{t_1} \right) \left[\text{erf} \left(\frac{t}{w} - \frac{w}{2+t_1} \right) + 1 \right] + \frac{B}{2} \text{Exp} \left(\frac{w^2}{4+t_2^2} - \frac{t}{t_2} \right) \left[\text{erf} \left(\frac{t}{w} - \frac{w}{2+t_2} \right) + 1 \right], \quad (1)$$

где A, B - амплитуды, w - время фотовозбуждения, t_1 и t_2 - релаксационные константы, t_d - время задержки. На рис. 2 представлено изменение константы t_1 в зависимости от длины волны.

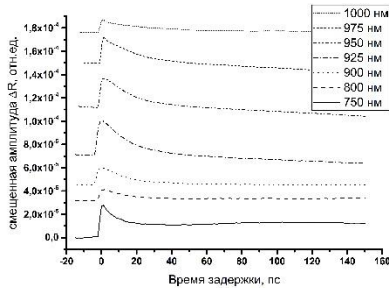


Рис. 1. Динамика фотовозбужденных носителей заряда в твердом растворе $\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{As}$

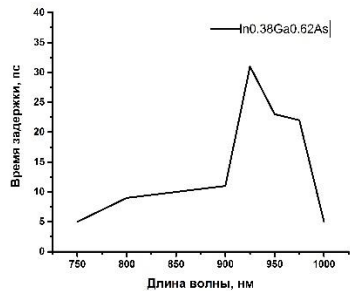


Рис. 2. Релаксационная константа t_1 в зависимости от длины волны

Список литературы

1. Ortiz V., et al. // J. Appl. Phys. 2007. V.102. №4. P.1–9.
2. Wells N.P., et al. // J. Appl. Phys. 2014. V.116. №7. P.073506.
3. Kimel A., et al. // Phys. Rev. B. 2001. V.63. P.1-8.

А.А. МАМРАШЕВ^{1,2}, Л.В. МАКСИМОВ^{1,3},
Н.А. НИКОЛАЕВ^{1,2}, П.Л. ЧАПОВСКИЙ^{1,3}

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

²*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

³*Новосибирский государственный университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРТО- И ПАРАИЗОМЕРОВ МОЛЕКУЛ ВОДЫ

Рассмотрены особенности применения широкополосной терагерцовой спектроскопии для исследования вращательных спектров ядерных спиновых изомеров молекул воды, а также измерения их относительной концентрации. Исследован вклад различных факторов в искажение экспериментальных спектров.

A.A. MAMRASHEV^{1,2}, L.V. MAXIMOV^{1,3},
N.A. NIKOLAEV^{1,2}, P.L. CHAPOVSKY^{1,3}

¹*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*

²*Institute of High Current Electronic SB RAS, Tomsk*

³*Novosibirsk State University*

APPLICATION OF TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY TO THE STUDY OF ORTHO AND PARA ISOMERS OF WATER MOLECULES

We consider application of terahertz time-domain spectroscopy to the study of rotational spectra of nuclear spin isomers of water molecules and to the measurement of their relative concentration. We examine various factors affecting the experimental spectra.

Одним из интересных, но малоизученных свойств молекул воды, являются ее ядерные спиновые изомеры, орто- и пара-Н₂О. Активно исследуются методы обогащения изомеров и механизмы их конверсии [1]. Для измерения относительной концентрации изомеров авторами предложено использовать метод широкополосной терагерцовой спектроскопии [2]. Для решения этой задачи измерялись терагерцовые спектры поглощения чистого азота при атмосферном давлении и паров воды в атмосфере при нормальных условиях. Далее проводилось сопоставление экспериментального спектра поглощения паров воды с теоретическим, построенным на основе данных HITRAN [3] с учетом

инструментальной функции спектрометра (рис. 1). Варьирование параметров теоретического спектра (концентрации орто- и параизомеров паров воды $n_{\text{орто}}$ и $n_{\text{пара}}$) в спектральном диапазоне от 0,15 до 1,05 ТГц позволило получить орто/пара отношение $n_{\text{орто}}/n_{\text{пара}} = 3,03 \pm 0,03$, наиболее близкое к теоретическому значению, равному 3.

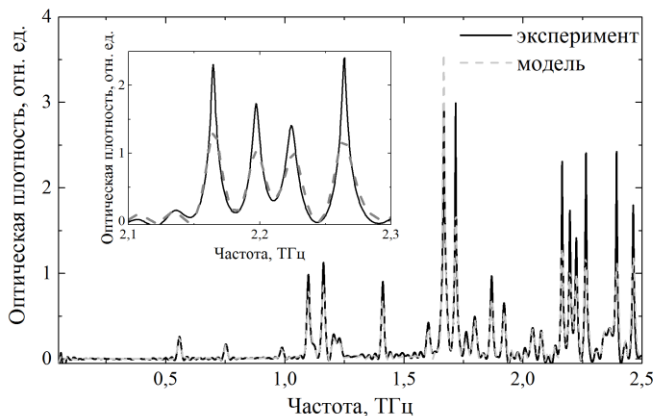


Рис. 1. Сравнение экспериментально измеренного (сплошная линия) и теоретического спектров (пунктирная линия) оптической плотности паров воды

Выявлены некоторые проблемы описанного метода. На более высоких частотах в экспериментальном спектре наблюдалось искажение формы линий и сдвиги частоты по сравнению с теоретическими предсказаниями (см. вставку на рис. 1). В настоящей работе рассмотрено влияние шума квантования, джиттера линии задержки, формы оконной функции спектрометра и других возможных причин наблюдаемого искажения экспериментальных спектров. Предложены альтернативные методы измерения отношения концентраций орто- и параизомеров, использующие значения амплитуд и площадей близких линий в спектре поглощения.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 17-12-01418.

Список литературы

1. Cacciani P., Cosléou J., Khelkhal M. Nuclear spin conversion in H_2O // Phys. Rev. A. 2012. V.85. Is.1. P.012521.
2. Mamrashev A.A., et al. Detection of Nuclear Spin Isomers of Water Molecules by Terahertz Time-Domain Spectroscopy // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017.
3. Gordon I.E., et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2017. V.203. P.3-69.

С.Е. АЛЕКСАНДРОВ, Г.А. ГАВРИЛОВ, А.А. КАПРАЛОВ,
Б.А. МАТВЕЕВ, К.Л. МУРАТИКОВ, Г.Ю. СОТНИКОВА
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ ИК-ФОТОМЕТРИИ В РЕШЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Приведены результаты исследований по развитию теплофизических методов контроля физических и технологических процессов и измерения характеристик новых перспективных материалов для радиационных детекторов и накопителей энергии. Разработанные методики основаны на использовании последних достижений в области создания фотодиодных ИК-температурных сенсоров, открывающих возможность высокоскоростных бесконтактных измерений истинной температуры в условиях динамически изменяющихся свойств объекта под воздействием лазерного излучения и/или мощных электромагнитных полей.

S.E. ALEKSANDROV, G.A. GAVRILOV, A.A. KAPRALOV,
B.A. MATVEEV, K.L. MURATIKOV, G.Yu. SOTNIKOVA
Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

OPTOELECTRONIC METHODS OF IR-PHOTOMETRY IN SOLVING OF THERMAL AND PHYSICAL PROBLEMS

The results of research on the development of thermal methods for monitoring physical and technological processes and measuring the characteristics of new promising materials for radiation detectors and energy harvesting are presented. The developed methods are based on the use of the latest achievements in the field of photodiode IR-temperature sensors, which open the possibility of high-speed contactless measurements of the true temperature under the conditions of dynamically changing properties of the object under the influence of laser radiation and / or powerful electromagnetic fields.

Развитие различных отраслей науки и техники неразрывно связано с исследованиями теплофизических свойств новых материалов и технологий, базирующихся на создания систем бесконтактного контроля температуры (пирометрии) с новыми измерительными возможностями. Современные тенденции пирометрии связаны с созданием полупроводниковых фотодиодных (ФД) пирометрических сенсоров, обладающих как высокими быстродействием и чувствительностью, так и высокой спектральной селективностью и надежным метрологическим обеспечением. Нами разработаны пирометрические сенсоры на основе двухспектральных АЗВ5

фотодиодных структур среднего ИК-диапазона [1], позволяющие существенно повысить точность и метрологическую надежность радиационных измерений истинной температуры объектов. Оригинальные методические, схемотехнические и конструктивные решения сенсоров, защищенные патентами [2, 3], позволили создать ряд уникальных экспериментальных установок для решения теплофизических задач:

- двухспектральный пирометрический сенсор впервые позволил решить задачу контроля технологического процесса коагуляции наночастиц серебра при разработке эффективных композиций и режимов печати функциональных пленок для устройств электроники и фотоники методом ink-jet технологии [4];
- высокоскоростной двухспектральный пирометрический сенсор с временным разрешением до 1 мкс и диапазоном измерения от 200 до 5000°C впервые позволил контролировать температуру поверхностей различных материалов в исследованиях циклического воздействия тепловых потоков, создаваемых плазмой. Взаимодействие плазмы с поверхностью является важной проблемой создания защитных материалов термоядерных установок. Эксперименты по взаимодействию вольфрамовых элементов с водородной, дейтериевой и гелиевой плазмами показали, что оно может приводить к изменению структуры, развитию пористости и охрупчиванию конструкционных материалов реакторов [5].

Авторами разработаны экспериментальные оптоэлектронные методы измерения коэффициента теплоотдачи твердотельных объектов [6] и пироэлектрического коэффициента объемных сегнетоэлектрических материалов [7]. Методы основаны на прямых бесконтактных измерениях динамики изменения температуры поверхности образцов при импульсном и/или периодическом тепловом лазерном воздействии. Предложенный экспериментальный метод, реализуемый на ФД пирометрических сенсорах среднего ИК-диапазона, позволяет существенно повысить точность измерений и устранить значительный разброс данных по параметрам пироэлектрического эффекта, необходимых для дальнейшего развития ИК-сенсоров и энергопреобразователей на сегнетоэлектрических материалах.

Список литературы

1. Электронный ресурс – <http://www.ioffeled.com>.
2. Патент РФ № 2610073, 2017.
3. Патент РФ № 2622239, 2017.
4. Zymelka D., Matveev B., et al. // Flexible and Printed Electronics. 2017. V.2. P.045006.
5. Воронин А.В., Александров А.Е. и др. // ЖТФ. 2016. Т.86. №3. С.51-57.
6. Александров С.Е., Гаврилов Г.А. и др. // ПЖТФ. 2017. Т.43. №14. С.104-110.
7. Александров С.Е., Гаврилов Г.А. и др. // ПЖТФ, 2017. Т.43. №23. С.77-85.

Н.В. КОВАЛЕНКО¹, Г.А. АЛОЯН¹, А.В. КОНЯШКИН^{1,2},
О.А. РЯБУШКИН^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

²*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ

С использованием термодатчиков из оптически прозрачных пьезоэлектрических кристаллов малых размеров были проведены измерения эквивалентной температуры поверхности линзы в нескольких точках, при её разогреве лазерным излучением. Разработана теоретическая модель, позволяющая оценить точность измерения температуры поверхности методом радиочастотной спектроскопии и подобрать оптимальные размеры терморезонаторов для измерения температуры поверхностей различных оптических элементов при взаимодействии с лазерным излучением.

N. V. KOVALENKO¹, G. A. ALOIAN¹, A. V. KONYASHKIN^{1,2},
O. A. RYABUSHKIN^{1,2}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology State University), Dolgoprudny*
²*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

SURFACE EQUIVALENT TEMPERATURE

Using temperature detectors made of small transparent piezoelectric crystals measurements of surface equivalent temperature in different points of lens heated by laser irradiation. Numerical model was investigated to calculate appropriate size of thermoresonators for measuring surface temperature of optical elements interacting with laser irradiation using radiofrequency spectroscopy.

Воздействие мощного лазерного излучения на оптические элементы приводит к их неоднородному разогреву, что, в свою очередь, может приводить не только к изменению их оптических свойств, но и к необратимой деградации и разрушению. Это обуславливает необходимость измерения и контроля температуры поверхности различных элементов оптических систем в процессе взаимодействия с лазерным излучением.

Для измерения температуры поверхности линзы на неё помещаются термодатчики малых размеров из прозрачных нелинейно-оптических кристаллов, которые являются пьезоэлектриками и при воздействии

внешнего радиочастотного поля в них могут возбуждаться резонансы, частоты которых сильно зависят от температуры. Для однозначного сопоставления резонансной частоты с температурой кристалла производится калибровка при однородном разогреве терморезонатора. При неоднородном разогреве кристалла сдвигу резонансной частоты ставится в соответствие изменение эквивалентной температуры терморезонатора, которая близка к его средней термодинамической температуре [1]. Терморезонаторы должны находиться в хорошем тепловом контакте с исследуемым образцом и быть прозрачными для длин волн воздействующего лазерного излучения, чтобы не было дополнительного разогрева за счёт поглощения рассеянного излучения.

На поверхность линзы из кварцевого стекла, через центр которой пропускалось непрерывное лазерное излучение (11 W, 1064 нм) были помещены 5 терморезонаторов из кристалла ниобата лития на различном расстоянии от центра. Для оценки точности измерения температуры поверхности данным методом была разработана теоретическая модель, позволяющая учитывать неидеальность теплового контакта и конвективное охлаждение всех элементов воздухом. Также в модельном эксперименте (рис. 1) было исследовано влияние размеров терморезонатора на погрешность определения температуры поверхности (рис. 2). Уменьшение ширины и длины терморезонатора приводило к небольшому изменению величины погрешности, в то время как уменьшение его высоты существенно снижает погрешность.

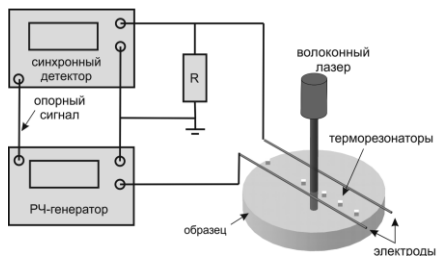


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

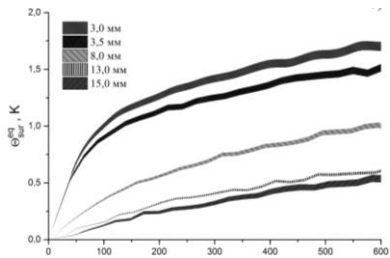


Рис. 2. Кинетики эквивалентных температур поверхности линзы

Список литературы

1. Ryabushkin O.A., et. al. // Journal of the European Optical Society. 2011. V.6. P.11032.

Т.О. ЛУКАШОВА^{1,2}, В.Н. ТРЕЩИКОВ²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*ООО «Т8», Москва*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА РАССЕЯНИЯ РЭЛЕЯ

Проведено численное моделирование одноимпульсного и двухимпульсного когерентных рефлектометров рассеяния Рэля. Показана возможность реализации на базе двухимпульсной схемы фазочувствительного рефлектометра. В результате численного моделирования и теоретического рассмотрения продемонстрирована линейная зависимость набега фазы между двумя импульсами от вариации температур. Приведены результаты расчета температурного коэффициента набега фазы теоретически, при численном моделировании и экспериментально.

T.O. LUKASHOVA^{1,2}, V.N. TRESHCHIKOV²

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*T8 Ltd, Moscow*

NUMERICAL SIMULATION OF DISTRIBUTED SENSOR FOR TEMPERATURE MEASURING BASED ON COHERENT RAYLEIGH SCATTERING REFLECTOMETER

Numerical simulation of a single-pulse and two-pulse coherent Rayleigh scattering reflectometers was carried out. It is shown that a phase-sensitive reflectometer can be realized on the basis of a two-pulse scheme. As a result of numerical modeling and theoretical consideration, a linear dependence of the phase shift between two pulses on the temperature variation is demonstrated. The results of calculating the temperature coefficient of the phase incursion theoretically, for numerical simulation and experimentally are presented.

Распределенные оптоволоконные датчики позволяют удаленно измерять физические величины и реализовать работу распределенных систем обнаружения и контроля безопасности протяженных объектов [1]. Методы оптической рефлектометрии базируются на явлениях комбинационного рассеяния света, рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, Рэля [2] либо решетках Брэгга, интегрированных в волокно .

На основе математической модели, предложенной в [3], проведено численное моделирование одноимпульсного и двухимпульсного когерентных рефлектометров рассеяния Рэля. Одноимпульсная схема

даёт только качественное заключение о наличии температурного воздействия. Двухимпульсная схема позволяет вычислить набег фаз между импульсами $\Delta\varphi$. Волокно зондируется последовательностью из четырех пар импульсов. Каждый второй импульс в паре сдвинут по фазе относительно первого на $\Delta\varphi_{\text{ф.л.}} = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Получившаяся рефлектограмма является результатом интерференции. Можно показать:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n}{\lambda} 2 \frac{c\tau}{2n} \beta \Delta T = \alpha \Delta T,$$

где τ – время задержки импульсов в паре, β – коэффициент [4], учитывающий термооптический эффект и термическое растяжение. Взяв $\beta = 9,15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\lambda = 1550$ нм, $\tau = 300$ нс, получаем оценку для температурного коэффициента набега фаз $\alpha \approx 3450$ рад/град. Линейная зависимость набега фаз наблюдается и в численной модели (ЧМ): на рис. 1 представлен результат для нескольких точек волокна (каналов). Различия в каналах обусловлено наличием случайной компоненты в набеге фазы. ЧМ дает оценку $\alpha \approx 3440$ рад/град, относительное стандартное отклонение $\delta = 2\%$. В работе [5] были представлены результаты эксперимента, проведенного на оборудовании «Дунай-2» - двухимпульсном рефлектометре: $\alpha \approx 3200$ рад/град.

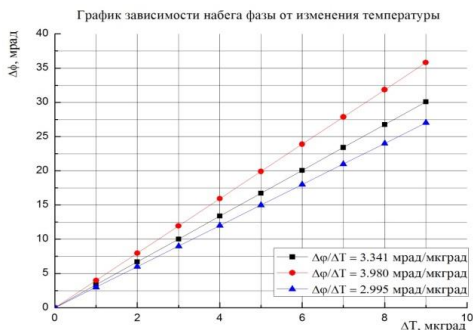


Рис. 1. Зависимость набега фазы от изменения температуры - результат ЧМ

Таким образом, продемонстрированная ЧМ хорошо согласуется с результатами теоретической оценки и физического эксперимента.

Список литературы

1. Горбуленко В.В. и др. // Фотон-Экспресс 2014. №5 (117). С.12-15.
2. Palmieri L. // The Open Optics Journal. 2013.V.7 (Suppl-1, M7). P.104-127.
3. Mermelstein M.D. // Optics Letters. 2001. V.26.
4. Othonos A. // Artech House, London, 1999.
5. Кузьменков А.И и др. // 7й Росс. семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, 2016.

Н.Э. НИКОЛАЕВ, С.В. ПАВЛОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ TE_1 И TM_1 МОД ОПТИЧЕСКИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ВОЛНОВОДОВ

В работе исследуется температурная зависимость эффективного показателя преломления оптических золь-гель волноводов. В процессе исследования получена аналитическая формула зависимости температурного коэффициента TE и TM мод оптических планарных волноводов, позволяющая оценить вклад основных факторов на его величину.

N.E. NIKOLAEV, S.V. PAVLOV, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

TEMPERATURE COEFFICIENT OF EFFECTIVE REFRACTIVE INDEX OF THE TE_1 AND TM_1 MODES IN OPTICAL SOL-GEL WAVEGUIDES

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.

Пленки SiO_2-TiO_2 [1], изготовленные по золь-гель технологии отличаются от широко используемых пленок на основе диоксида кремния специфическими свойствами, такими как отрицательный температурный коэффициент, возможность варьирования показателя преломления, пористость и др. Эти свойства позволяют расширить функциональные возможности базовых элементов на их основе.

Материалы с отрицательным ТОК находят применение для температурной подстройки интерференционных устройств интегральной оптики, таких как узкополосные фильтры, резонаторы, интерферометры Маха-Цандера, мультиплексоры/демультиплексоры и др. Большой термооптический коэффициент особенно важен, для создания термооптических переключателей, коммутаторов и др. устройств с термоуправлением [2].

Эффективность использования температурного регулирования параметрами волноводных устройств невозможна без детального изучения особенностей температурных свойств оптических волноводов.

Целью настоящей работы является изучение особенности температурной зависимости эффективного показателя преломления (ЭПП) оптических волноводов на основе золь-гель материалов, выявление закономерности изменения температурного коэффициента (ТК) ЭПП и поиск путей его регулирования. При определенных параметрах материала пленки зависимость ЭПП волноводных мод от температуры может иметь различный характер (рис. 1).

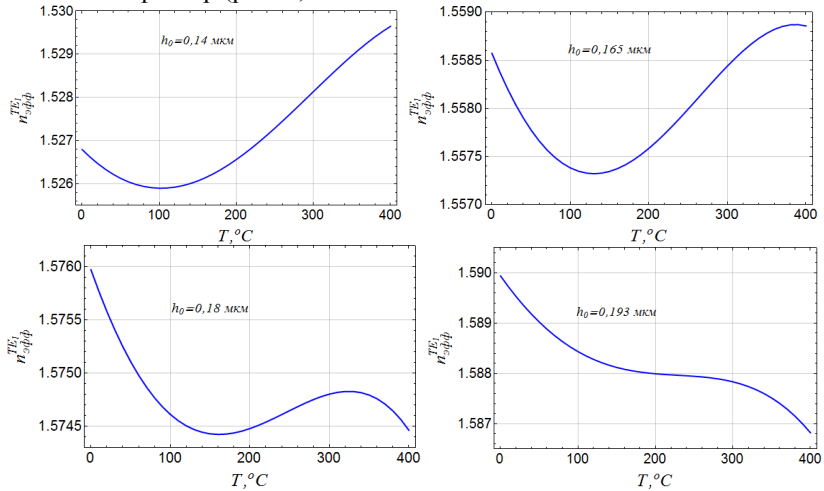


Рис. 1. Зависимость ЭПП TE_1 -моды от температуры с показателем преломления золь-гель пленки $n_2 = 1,8$ для различных значений толщины h_0 при $T = 0^\circ C$

В ходе исследования была получена аналитическая формула ТК ЭПП оптических планарных волноводов, описывающая влияние основных факторов на его величину, которая также позволяет оценить и рассчитать необходимые параметры пленок для заданного значения ТК ЭПП мод в конкретных задачах температурной подстройки или термоуправления устройств ИО.

Список литературы

1. Чехлова Т.К., Живцов С.В., Погосян А.С. Оптические волноводы на основе плёнок, изготовленных по технологии золь-гель // Вестник РУДН. Серия Физика. 2005. № 1 (13). С.35-47.
2. Грабовский Е.И., Живцов С.В., Чехлова Т.К. Температурная зависимость золь-гель волноводов // РЭ. 2006. Т.51. №7. С.834.

Н.В. МАСАЛЬСКИЙ

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ С ГАУССОВЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»

Обсуждается применимость технологического метода для улучшения оптических характеристик широкоапертурных гетерогенных волноводных структур, выполненных на базе технологии «кремний на изоляторе», в которых оптический тракт дополнительно легирован примесью, профиль которой описывается гауссовой функцией.

N.V. MASALSKY

Scientific research institute of system achievement of the RAS, Moscow

THE OPTICAL WAVEGUIDES WITH GAUSS DOPING PROFIL ON THE BASIS OF “SILICON ON INSULATOR” STRUCTURE

The applicability of a technological method for improving of optical characteristics of the wide aperture optical waveguide structures executed on "silicon on the insulator" technologies in which doping profile in the form of Gauss's function of an optical core is used is discussed.

Целью данной работы является исследование возможности улучшения оптических характеристик гетерогенных КНИ волноводных устройств (КНИ – технология «кремний на изоляторе») при помощи дополнительного легирования оптического тракта.

Для гетерогенных полосковых КНИ оптических волноводов, в которых дополнительно сформированы области с высокой концентрацией двух типов - электронов и дырок - свободных носителей заряда (рис. 1а), как известно, основные паразитные потери приходятся на первую моду. Для ее эффективного подавления недостаточно этих высоколегированных областей, которые призваны обеспечить нехарактерное одномодовое поведение широкоапертурных (свыше 10 мкм) высококонтрастных волноводов КНИ с кремниевой сердцевиной толщиной ~ 220 нм, так как основная часть распределения данной моды, включая ее пики, которые приходятся на края сердцевины волноводной структуры. Для более эффективного подавления моды m_1 мы используем дополнительное легирование сердцевины (в данном случае примесью n^+ типа). Профиль

легирующей примеси близок к гауссовому в виде $N_A(x) = N_A^{\max} \exp(-(x/\sigma)^2)$. Варьируя параметрами N_A^{\max} и σ можно добиться эффективного подавления моды m_1 , незначительно изменяя характеристики фундаментальной моды.

Такая конструкция обеспечивает высокий уровень модовой селекции, подавление переизлучения через боковую грань волновода, позволяет понизить уровень легирования высоколегированных областей и препятствует диффузии примеси из них в сердцевину.

В качестве иллюстрации численно исследовался широкоапертурный оптический волновод с общей апертурой 35 мкм и апертурой сердцевины 11 мкм с дополнительным легированием ($N_A^{\max} = 9.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\sigma = 0.87 \text{ мкм}$). Расчеты проводились методом распространяющихся пучков и методом конечных разностей во временной области. По результатам моделирования показано, что для рассматриваемого волновода с характеристической длиной, при которой оптические потери фундаментальной моды составляют -3 дБ, дополнительное затухание для мод высших порядков относительно уровня затухания фундаментальной моды составляет -31 (-24) дБ для моды m_1 и -36 (-32) дБ для моды m_2 . В скобках указаны значения затухания для такой же структуры, но без дополнительного легирования. Результаты расчетов затухания моды m_1 приведены на рис. 1б. Такая архитектура прошла экспериментальную апробацию.

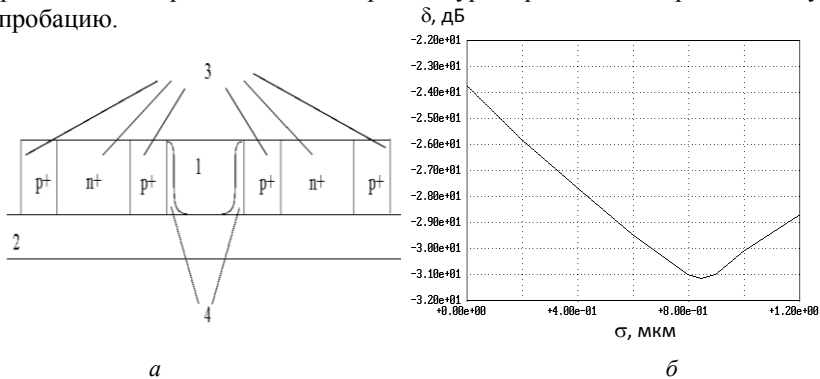


Рис. 1. Схема КНИ гетерогенной волноводной структуры: 1 - кремниевая сердцевина, 2 - слой SiO_2 , 3 - высоколегированные области, 4 - области дополнительного легирования (а); зависимость затухания моды m_1 от σ при $N_A^{\max} = 9.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (б)

Т.С. ТЕБЕНЕВА, О.В. БЕНДЕРОВ, Б.С. СТЕПАНОВ¹,
А.И. ИГНАТОВ²

*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва*

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ

Разработаны волоконно-оптические разветвители на основе одномодовых халькогенидных волокон с коэффициентом деления мощности на длине волны 1.5 мкм 55:45, и на длине волны 2.64 мкм - 63:37 с избыточными потерями равными 5 дВ.

T.S. TEBENEVA, O.V. BENDEROV, B.S. STEPANOV¹,
A.I. IGNATOV²

Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny

¹*G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,
Nizhny Novgorod*

²*All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow*

CHALCOGENIDE OPTICAL FIBER COUPLERS MADE BY FBT METHOD

Fiber-optic splitters based on single-mode chalcogenide fibers with a coupling ratio of 55:45 at 1.5 μm , and 63:37 at 2.64 μm with an excess loss of 5 dB have been developed.

В настоящее время, для развития оптических приборов в среднем ИК-диапазоне необходимы новые волоконно-оптические устройства, такие как разветвители, волновые мультиплексоры, кольцевые резонаторы и т.д. [1, 2].

Целью данной работы является разработка одномодового волоконного разветвителя на основе халькогенидных оптических волокон. Было проведено предварительное моделирование требуемых геометрических параметров разветвителя для достижения необходимого коэффициента

деления мощности на выходе разветвителя при сохранении низких избыточных потерь. Для экспериментальной реализации разветвителя был разработан стенд, позволяющий отслеживать мощность на выходных портах разветвителя.

В работе использовались одномодовые оптоволоконные изделия изготовленные из стекла As_2S_3 с диаметром сердцевины/оболочки 6.3/123 мкм, числовой апертурой равной 0.17, и оптическими потерями ~ 200 дБ/км на длинах волн 2.1–2.2 мкм, изготовленные в ИХВВ РАН. Для создания волоконного разветвителя применялся метод FBT (fused biconical taper). Два участка волокна были четыре раза скручены между собой и зафиксированы. К концам волокон были прикреплены калиброванные 1.5-граммовые грузы, для поддержания постоянного натяжения. Сплавка волокон производилась потоком аргона при температуре ≈ 200 °С при постоянном натяжении волокон. В экспериментальной установке, в качестве источника сигнала использовался одномодовый диодный лазер с волоконными выводами с длиной волны излучения 1.5 мкм. Для мониторинга мощности на выходных портах разветвителя использовались два фотодетектора InGaAs от Hamamatsu. Коэффициент деления был измерен на длинах волн 1.5 и 2.64 мкм с использованием одномодового диодного лазера от Nanoplus и фотодиода InAs от Hamamatsu (рис. 1). Достигнутый коэффициент деления на длине волны 1.5 мкм составил 55:45 при избыточных потерях 5 дБ. На длине волны 2.64 мкм коэффициент деления составил 63:37.

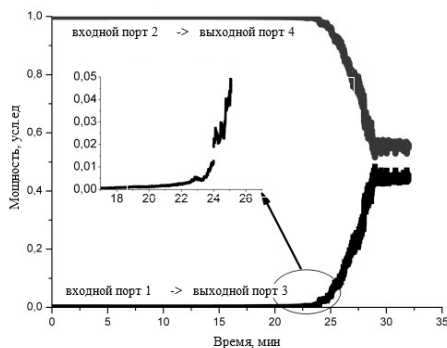


Рис. 1. Зависимость коэффициента деления от времени

Список литературы

1. Stevens G., Woodbridge T. Mid-IR fused fiber coupler // Proc. SPIE. 2016. V.9730. P.973007.
2. Tavakoli F., et al. Broadband and wavelength-dependent chalcogenide optical fiber couplers // Photon. Technol. Lett. 2017. V.29 (9). P.735-738.

А.С. АЛЕКСЕЕВ, С.Г. НОВИКОВ, А.В. БЕРИНЦЕВ,
В.А. РОДИОНОВ, В.В. СВЕТУХИН

Ульяновский государственный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛОКОННОГО СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ РАДИАЦИОННЫХ ГАММА-ИСТОЧНИКОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований волоконных образцов сенсорных элементов на базе композиций пластиковых сцинтилляторов, спектросмещающих и стандартных волокон с использованием радиационного источника ^{60}Co . Показано, что образцы линейно чувствительны к гамма-излучению в диапазоне мощностей доз от 1 до 5 мГр/с.

A.S. ALEKSEYEV, S.G. NOVIKOV, A.V. BERINTSEV,
V.A. RODIONOV, V.V. SVETUKHIN

Ulyanovsk State University

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FIBER SENSOR FOR GAMMA RADIATION SOURCES DOSIMETRY

The results of experimental investigations of fiber optic sensors samples, which consist of plastic scintillator, waveshifting and clear fibers, with ^{60}Co radiation source are presented. The samples showed linear response to gamma radiation in the doserate range 1 mGy/s to 5 mGy/s of gamma radiation.

Перспективным направлением является разработка волоконно-оптических сенсорных элементов для применения в составе многоканальных волоконных дозиметрических систем на объектах атомной отрасли [1, 2]. Работа выполнялась с целью исследования радиационной чувствительности образцов сенсорных элементов на базе композиций пластиковых сцинтилляторов, спектросмещающих и стандартных волокон.

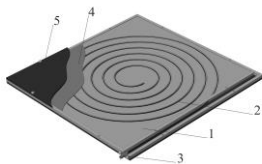


Рис. 1. Конструкция сенсора

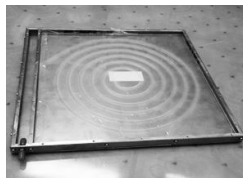


Рис. 2. Изображение сенсора

На рис. 1 и 2 представлены конструкция сенсорного элемента и его изображение. Основу сенсора составляет листовой пластиковый сцинтиллятор BC-412 (1) размером 300x300x3 мм, в котором при помощи лазера сделана спиральная канавка глубиной 1,5 мм. В канавке при помощи оптического цемента BC-600 закреплено спектросмещающее оптическое волокно BCF-91A (2) в сборе с оптической вилкой (3). Листовой пластиковый сцинтиллятор помещен между двух металлических зеркал (4). Вся конструкция размещается в металлическом корпусе (5), состоящем из двух боковых стенок, передней, задней и внутренней стенок, а также закрывающих их сверху и снизу идентичных крышек. Проводились экспериментальные исследования 3 таких сенсорных элементов в составе волоконной дозиметрической системы с использованием радиационного источника на базе ^{60}Co . Структурная схема такой системы изображена на рис. 3. На рис. 4 представлены зависимости количества импульсов на выходе дозиметрической системы от мощности дозы для исследуемых образцов. Полученные зависимости имеют выраженный линейный характер в диапазоне мощностей доз от 1 до 5 мГр/с. Разница в радиационной чувствительности объясняется конструктивными отличиями образцов.



Рис. 3. Структурная схема дозиметрической системы

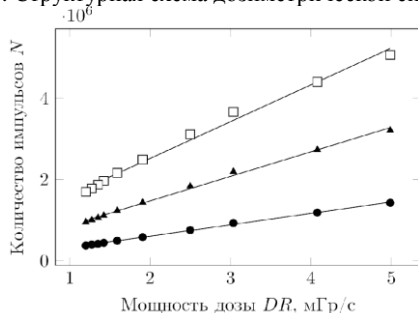


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований

Список литературы

1. Novikov S.G., Berintsev A.V., et. all. // Applied Mechanics and Materials, V.835. P.626-631.
2. Новиков С.Г., Черторийский А.А. и др. Патент RU167517U1. 2016.

Н.В. МИНАЕВ, В.С. ЖИГАРЬКОВ, Е.С. ЧУРБАНОВА,
В.И. ЮСУПОВ, В.Н. БАГРАТАШВИЛИ

*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

ЛАЗЕРНАЯ ПЕЧАТЬ ГЕЛЕВЫМИ МИКРОКАПЛЯМИ С ЖИВЫМИ КЛЕТОЧНЫМИ И МИКРОБНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Представлены результаты экспериментов по лазерной печати гелевыми микрокаплями, выступающими в качестве носителей живых микробных и клеточных объектов. Исследовалась динамика транспортных процессов с помощью высокоскоростной оптической видеосъемки и оптоакустических методов, что позволило определить характеристики формируемых гелевых струй и оптимизировать режим работы лазера.

N.V. MINAEV, V.S. ZHIGARKOV, E.S. CHURBANOVA,
V.I. YUSUPOV, V.N. BAGRATASHVILI

*¹Institute of Photonic Technologies – branch of FSRC “Crystallography and Photonics”
of the RAS, Troitsk*

LASER PRINTING OF GEL MICRODROPS WITH LIVING CELLULAR AND MICROBIAL OBJECTS

The report presents the results of experiments on laser printing with gel microdrops acting as carriers of living microbial and cellular objects. The dynamics of transport processes with the help of high-speed optical video and optoacoustic methods was studied, which made it possible to determine the characteristics of the formed gel jets and to optimize the operating mode of the laser.

В последнее время активно развивается технология лазерноиндуцированного переноса вещества (в англоязычной литературе - LIFT – Laser induced forward transfer) [1], которая широко применяется в биомедицине для печати биологических материалов [2], стволовых клеток в области клеточной инженерии, изолирования отдельных клеток [3], а в самое последнее время, и для выделения (микросамплинга) труднокультивируемых микроорганизмов [4].

Для реализации процесса лазерного переноса на практике, на донорную пластинку, представляющую собой пластинку стекла с нанесенным на рабочую сторону тонким поглощающим покрытием (наиболее часто используется золото), наносится слой гелевого субстрата, содержащего в себе наполнитель (живые клетки или агрегаты клеток,

почвенные носители микроорганизмов). Лазерное излучение импульсного лазера фокусируется на поглощающем слое, затем под действием лазерного импульса небольшая часть поглощающего слоя испаряется. В результате, возникает скачок давления, который приводит к переносу микрокапли гелевого субстрата с микробиологическими объектами на акцепторную пластинку. Параметры процесса лазерного переноса в значительной степени зависят от параметров лазерного импульса (длина волны, длительность, энергия, интенсивность, параметров фокусировки), толщины и структуры поглощающего покрытия, его материала, а также от толщины слоя гелевого субстрата, его состава, однородности, вязкости, величины поверхностного натяжения. На клеточные и микробные объекты в процессе лазерной печати, оказывает воздействие целый ряд физических факторов: лазерное излучение, прошедшее через поглощающий слой; ударные волны; высокие температуры; широкополосное оптическое излучение, связанное с образованием плазмы в поглощающем слое; наночастицы поглощающего слоя, которые вместе с гелем могут переноситься на акцепторную подложку. Крайне актуальным является определение уровня воздействия таких процессов на живые системы и их минимизация, чему и посвящена текущая работа.

Технология лазерного переноса позволяет целенаправленно переносить нужное микроскопическое количество вещества (отдельные клетки и их агрегаты, частицы биотканей и носителей клеток и микроорганизмов). Такой подход позволил реализовать процесс лазерного выделения микробных объектов из почвенных носителей с целью выделения труднокультивируемых и некультивируемых классическими методами микроорганизмов, которые могут найти применение в биомедицине и фармацевтике в качестве источников новых биологически активных веществ и антибиотиков. Одним из основных результатов представляемой работы [5] является выделение трудно культивируемого микроорганизма вида «*Nonomuraea*» из черноземного грунта Саратовской области, являющегося перспективным с точки зрения фармацевтики.

Список литературы

1. Unger C., Gruene M., Koch L., Koch J., Chichkov B.N. // Appl. Phys. A. 2011. V.103(2).
2. Koch L., Kuhn S., Sorg H., Gruene M., Schlie S., Gaebel R., Chichkov B. // Tissue Eng. Part C: Methods. 2009. V.16(5). P.847.
3. Deng Y., Renaud P., Guo Z., Huang Z., Chen Y. // J. Biol. Eng. 2017. V.11(1). P.2.
4. Ringeisen B.R., Rincon K., Fitzgerald L.A., Fulmer P.A., Wu P.K. // Methods in Ecology and Evolution. 2015. V.6(2). P.209.
5. Юсупов В.И., Жигарьков В.С., Чурбанова Е.С., Чутко Е.А., Евлашин С.А., Горленко М.В., Чепцов В.С., Минаев Н.В., Баграташвили В.Н. Лазероиндуцированный перенос гелевых микрокапель для клеточной печати // Квантовая электроника. 2017.

Д.А. КОЛЫМАГИН¹, Р.Д. ЗВАГЕЛЬСКИЙ¹, Д.А. ЧУБИЧ¹,
А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ^{1,2,3}

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

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

³*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, СОЗДАННЫЕ МЕТОДОМ STED-DLW СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ: МОРФОЛОГИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Методом STED-DLW стереолитографии получены двумерные (фотонные антенны) и трехмерные (фотонные кристаллы) периодические полимерные структуры. Измерены их морфологические особенности методами SEM и AFM, а также исследованы их оптические свойства при помощи Фурье-спектроскопии и конфокальной микроскопии.

D.A. KOLYMAGIN¹, R.D. ZVAGELSKY¹, D.A. CHUBICH¹,
A.G. VITUKHNOVSKY^{1,2,3}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology State University), Dolgoprudny*

²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

³*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

PERIODICAL STRUCTURES FABRICATED BY STED-DLW STEREO LITHOGRAPHY: MORPHOLOGY AND OPTICAL PROPERTIES

Two-dimensional (photonic antennas) and three-dimensional (photonic crystals) periodic polymer structures were fabricated by STED-DLW stereolithography. Their morphological features were measured using SEM and AFM methods, also their optical properties were investigated by Fourier spectroscopy and confocal microscopy.

Современная технология поверхностно-усиленного ИК поглощения SEIRA (Surface-Enhanced Infrared Absorption) дает возможность увеличивать чувствительность поглощения до 5 порядков в сравнении с обычными методами ИК-спектроскопии пропускания. Эффект достигается путем использования металлической периодической подложки [1]. Маску для создания таких фотонных антенн возможно создать при помощи прямого лазерного письма (DLW – Direct Laser

Writing). Данный метод основан на явлении полимеризации при освещении фоторезиста излучением фемтосекундного лазера.

Разрешение DLW при постоянной длине волны возбуждения можно повысить, если использовать идею STED (STimulated Emission Depletion – гашение вынужденным излучением) для уменьшения размера эффективно возбужденной области. Суть метода заключается в использовании второго лазера гашения для стимулирования излучательных переходов по краю фокального пятна, то есть для уменьшения размера возбужденной области путем использования электромагнитного поля тушения.

В дальнейшем возможна металлизация методом lift-off созданного при помощи стереолитографии шаблона с образованием серебряной/золотой структуры, оптические свойства которой представляют отдельный интерес прежде всего за счет плазмонных эффектов. Создана установка для STED-DLW стереолитографии на основе фемтосекундного Ti:Sapphire лазера с перестраиваемой длиной волны излучения 720-860 нм и длительностью импульса 50 фс, а также непрерывного лазера гашения с длиной волны 532 нм; подобраны состав фоторезиста и параметры STED-DLW литографии [2]. При помощи улучшенной технологии прямого лазерного письма были созданы 2D- (рис. 1) и 3D-периодические структуры с разными пространственными периодами. Морфология полученных структур была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии, а также были исследованы их оптические свойства при помощи Фурье-спектрометрии и сканирующей лазерной конфокальной микроскопии.

Авторы выражают благодарность Елисееву С.П. за помощь с люминесцентными измерениями, а также Сычеву В.В. за ценные консультации и техническую помощь. Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ №17-79- 20418). Изучение спектральных свойств 2D-периодических структур выполнялось в рамках проекта РФФИ № 17-02- 01408.

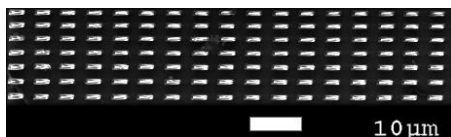


Рис. 1. SEM-изображение периодической 2D структуры «штрихи»

Список литературы

1. Jahn M., Patze S., Hidi I.J., et al. // *Analyst*. 2016. V.141. P.756-793.
2. Vitukhnovsky A.G., Chubich D.A., Eliseev S.P., et al. // *J. Russ. Laser Res.* 2017. V.38. No.4. P.377-384.

С.В. КРУЖАЛОВ, А.П. ЛАВРОВ, М.Б. ЛЕОНОВ¹,
И.В. МАТЮШИН², М.А. ПАРПИН¹, Д.А. СЕРЕГИН¹,
Н.Д. ВАСИЛЬЕВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
¹*Научно-проектный центр Оптоэлектронных комплексов наблюдения -*
филиал АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург
²*ООО «Вегалюкс», Санкт-Петербург*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ДВУМЕРНОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ФРЕНЕЛЯ ПРИ СИНТЕЗЕ ЕЕ КОЛЕЦ НАБОРОМ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ

Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования фокусирующих свойств прототипа зонной пластинки Френеля диаметром 6,78 мм, образованной 201 отверстием в металлической фольге.

S.V. KRUZHALOV, A.P. LAVROV, V.B. LEONOV¹,
I.V. MATYUSHIN², M.A. PARPIN¹, D.A. SEREGIN¹,
N.D. VASILYEV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
¹*Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes*
- Branch of JSC "Kometa Corporation", Saint-Petersburg
²*LLC "Vegaluks", Saint-Petersburg*

MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FOCUSING PROPERTIES OF TWO-DIMENSIONAL FRESNEL PLATE IN ITS RINGS SYNTHESIS BY MANY SMALL HOLES

The results of the numerical simulation and experimental investigation of simple prototype of photon sieve with diameter 6.78 mm formed by 201 holes in metal foil are given.

В последнее десятилетие отмечается большой интерес к исследованию путей создания телескопов с большой апертурой на основе использования дифракционных элементов в противоположность рефракционным (линзам) или зеркальным элементам. В таком подходе дифракционный элемент может быть выполнен на основе легкой тонкой плоской

непрозрачной пленки с большим числом (10^6 и более) отверстий. По существу в основе такого типа дифракционных элементов лежит зонная пластинка Френеля (ЗПФ), в которой кольца «разбиваются» – они синтезируются большим числом изолированных, как правило, круглых отверстий с диаметром, близким к ширине соответствующего кольца зонной пластинки [1, 2].

Нами проведено численное моделирование фокусирующих свойств такого типа синтезированных ЗПФ, произведен расчет опытных образцов, содержащих отверстия в нескольких первых нечетных зонах пластинки: положения и размеры синтезирующих отверстий, и их количество. Расчеты проведены при следующих параметрах: длина волны оптического излучения $\lambda = 1$ мкм, фокусное расстояние кольцевой ЗПФ $F = 100$ см.

Для первоначальных экспериментов изготовлено несколько прототипов ЗПФ с отверстиями диаметром от 318 до 110 мкм (структуры с числом колец от 5 до 10). Прототипы выполнены на алюминиевой фольге толщиной 10 мкм. Технология изготовления отверстий – метод лазерной резки сфокусированным лазерным пучком с диаметром около 20 мкм. Отработка технологии проведена для нескольких тестовых образцов.

На рис. 1 для примера показан внешний вид одной их структур: 66 отверстий на внешней окружности радиусом 3239 мкм при общем числе отверстий 201, а на рис. 2 показано распределение интенсивности в плоскости фокусировки (измерения на длине волны 0,63 мкм). Ширина по половинному уровню составляет около 150 мкм. Расчеты и эксперименты показали, что в пределах поля 2см x 2см форма и параметры дифракционного пятна для такой структуры практически не изменяется. Для структуры диаметром 1,4 м и $F = 50$ м (диаметр отверстий от 2248 до 35 мкм) поле зрения по оценочным расчетам составляет около 0,2 градуса.

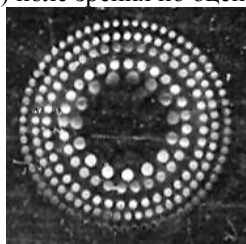


Рис. 1. Синтезированная зонная пластинка Френеля

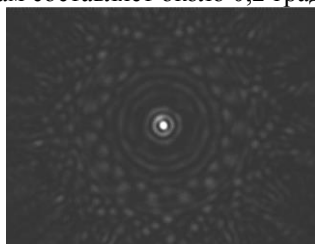


Рис. 2. Распределение интенсивности в плоскости фокусировки

Список литературы

1. Andersen G., Tullson D. // Applied Optics. 2007. V.46 (8). P.3706-3708.
2. Chen Z., Wang C., Pu D., Hu J., Chen L. // Optics Express. 2010. V.18 (15). P.16279-16288.

П.В. КАРЕВ

ООО «Промышленная метрология», Санкт-Петербург

ПЬЕЗОАКТЮАТОРЫ ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Пьезоактюаторы являются компактными, динамичными и точными приводами. Возможность работы на высокой частоте, недостижимой со стандартными электромагнитными двигателями, позволяет применять пьезоактюаторы в системах микросканирования линзой относительно ИК-детектора, в угловых дефлекторах для сканирования зеркалом с целью управления лазерным лучом. Использование тензометрических датчиков положения позволяет обеспечить высокую точность для применения в системах фокусировки.

P.V. KAREV

Industrial metrology Co LTD, Saint-Petersburg

PIEZOACTIVATORS MICRO MOTIONS FOR OPTOELECTRONIC APPLICATION

Piezo actuators are compact, dynamic and precise drives. Ability to work on high frequency, unattainable with standard electromagnetic motors, allows the use of piezo actuators in micro scanning systems with a lens scanning relative to the IR detector, in tip-tilt deflectors for scanning by a mirror to control the laser beam. The use of strain gage sensors allows providing high accuracy for use in focusing systems.

Пьезоактюатор с интегрированным усилителем перемещения АРА® (Amplified Piezoelectric Actuator) состоит из многослойной пьезокерамики и внешнего металлического корпуса, выполненного в форме эллипса. АРА® являются сжимающими пьезоактюаторами. Рабочей осью является малая ось корпуса пьезоактюатора, которая сжимается при подаче напряжения на пьезокерамику [1]. Эллиптический корпус пьезоактюатора АРА® (рис. 1) решает несколько задач, некоторые из них: обеспечение оптимальной механической преднагрузки многослойной пьезокерамики для наиболее эффективной работы в динамическом режиме (рис. 2); обеспечение увеличения хода пьезоактюатора за счет действия рычага; обеспечение возможности выдерживать большие перпендикулярные нагрузки и крутящие моменты; обеспечение механического интерфейса для крепления пьезокерамики и полезной нагрузки.

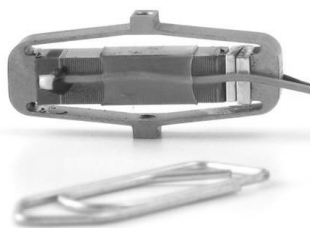


Рис. 1. Вид APA120S

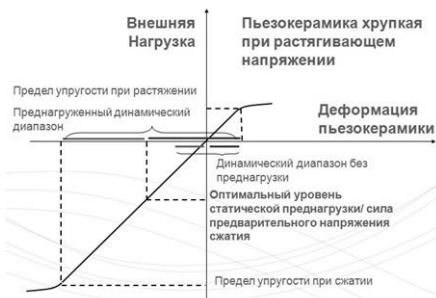


Рис. 2. Предварительное механическое напряжение пьезокерамики

Применение тензометрических датчиков обеспечивает возможность удержания положения со средним изменением в пределах менее ± 5 нм от исходного положения. Пьезоактуаторы АРА с интегрированным рычажным усилителем перемещения были использованы в летном применении в трехосевом сканирующем механизме для ROSETA/MIDAS с посадкой в 2014 году на изучаемую комету Чурюмова-Герасименко. MIDAS (сокращение от «MICRO-IMAGING DUST ANALIS SYSTEM») - атомный силовой микроскоп высокого разрешения для изучения частиц пыли [2, 3]. Пьезоактуаторы применяются для микросканирования с повышенной частотой для улучшения изображения матрицы; высокоскоростная работа пьезоэлектрических шторок в синхротронах; угловые дефлекторы (сканирующие зеркала). Пьезомеханизмы широко применяются в качестве электромеханических преобразователей для высоконадежных применений. Развивается применение пьезо механизмов в системах фокусировки лазерных источников лидаров. Развивается применение пьезо механизмов в криогенной среде.

Список литературы

1. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017.
2. Letty R. Le, Barillot F., Fabbro H., Claeysen F., Guay Ph., Cadiergues L., Karev P.V. Миниатюрные пьезоэлектрические механизмы для электрооптических и космических применений // Красногорск: Контенант. 2016. Т.15. №1. С. 67-72.
3. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли: материалы XIV конф. Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, филиал АО «РКЦ «Прогресс» НПП «ОПТЭК», 2017. С.320-324.

С.А. БАРЫШЕВ, С.Б. ОДИНОКОВ, А.С. КУЗНЕЦОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ПЛАЗМОННЫЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

Оптическая головка со слоем намагниченного граната используется для обнаружения присутствия тонких ферромагнитных слоев, и других носителей магнитной информации. Создана математическая модель системы. Падающий Р-поляризованный свет, подверженный влиянию гранатового слоя, поляризацию за счёт эффекта Фарадея. Сравнивая интенсивности проходящего через анализатор света можно обнаружить магнитный носитель информации.

S.A. BARYSHEV, S.B. ODINOKOV, A.S. KUZNETSOV
Bauman Moscow State Technical University

PLASMONIC MAGNETOOPTIC STRUCTURES FOR VISUALIZATION OF MAGNETIC INFORMATION

Optical head with magnetized garnet layer is used to detect presence of thin ferromagnetic layers such as printed text. Mathematical model of the system was created. Incident P-polarized light affected by garnet layer changes its polarization due to Faraday effect. We can detect presence or absence of magnetic information after studying changes in polarization of the reflected light.

Развитие экспериментальной и прикладной физики связано с увеличивающимся потенциалом технологии роста искусственных материалов. Новые технологии позволяют изготовление периодических структур с характеристическими размерами менее длин электромагнитных волн. Исследования структур такого класса дало начало теории плазмонных магнитооптических материалов. В последнее время, всё больший интерес к себе притягивает исследования резонансного усиления коэффициента пропускания и эффекта Фарадея в магнитооптических плазмонных наноструктурах [1, 2].

В данной работе рассматривается возможность использования таких структур для создания оптической головки с целью визуализации магнитных носителей информации. Модель головки показана на рис. 1 [3, 4]. Источником излучения в разработанной модели служить гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632.8\text{nm}$).

Свет от источника излучения проходит через поляризатором становясь Р-поляризованным. Такая поляризация требуется для возбуждения плазмонного резонанса. Далее претерпевает вращение плоскости поляризации в магнитооптическом веществе за счёт эффекта Фарадея и усилении его плазмонным резонансом. Магнитооптическим веществом являлся намагниченный висмут-замещенный железиттриевый гранат толщиной в 500 нм. Плазмонный резонанс возникает на нанесенной на гранат золотой решетке с периодом $D = 0,13 \mu\text{m}$. На рис. 2 представлены результаты математического моделирования структуры с золотой решеткой и без неё. Большая мощность излучения расходуется на возникновение плазмонного эффекта и на пике вращения плоскости поляризации процент проходящей энергии близок к нулю. В связи с этим учитывается оптимальное отношение угла поворота плоскости поляризации и мощности проходящего излучения.

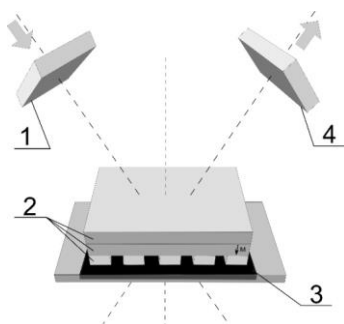


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - поляризатор, 2 - магнитооптическая структура, 3 - слой магнитного носителя информации, 4 - анализатор

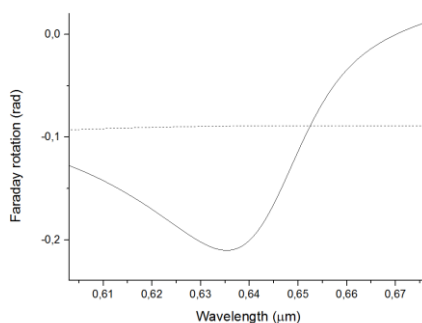


Рис. 2. Вращение плоскости поляризации, сплошная линия - с решеткой из золота, пунктирная - без решетки

Список литературы

1. Mizutani Y., Uchida H., Masuda Y., Baryshev A.V., Inoue M. Magneto-optical plasmonic Bi:YIG composite films with Ag and Au-Ag alloy particles // J.Magn. Soc.Jpn. 2009. V.33. P.481.
2. Baryshev A.V., Uchida H., Inoue M. Peculiarities of plasmon-modified magneto-optical response of gold-garnet structures // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V.30. Is.9. P.2371-2376.
3. Одинокоев С.Б., Кузнецов А.С., Карев А.В. Исследование возможности магнитооптической регистрации магнитных сигналов формата записи типа VHS // Естественные и технические науки. 2014. №4. С.122-124.
4. Одинокоев С.Б., Кузнецов А.С. Оценка разрешающей способности двуслойных магнитных структур // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. №2. С.21.

Д.В. ГОРБАЧ, С.А. НАЗАРОВ, Е.А. МЕЛЬНИКОВА,
С.Н. КУРИЛКИНА, А.Л. ТОЛСТИК

Белорусский государственный университет, Минск

СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Впервые реализовано спинорбитальное преобразование бесселевых световых пучков при их распространении в электрически управляемой жидkokристаллической ячейке. Проанализировано изменение поляризационной, фазовой и пространственной структуры пучка и показано, что при распространении бесселева светового пучка вдоль оси жидкого кристалла генерируется пучок с ортогональной поляризацией, при этом топологический заряд изменяется на две единицы.

D.V. GORBACH, S.A. NAZAROV, E.A. MELNIKOVA,
S.N. KURILKINA, A.L. TOLSTIK

Belarusian State University, Minsk

SPIN-ORBITAL TRANSFORMATION OF BESSEL LIGHT BEAMES BY LIQUID CRYSTAL ELEMENTS

The spin-orbital transformation of Bessel light beams at their propagation in electrically controlled liquid crystal cell has been realized for the first time. The change in the polarization, phase and spatial structure of the beam is analyzed and it is shown that a beam with orthogonal polarization and topological charge changed by two units is generated when a Bessel light beam propagates along the axis of a liquid crystal.

Понятие спин-орбитального преобразования в оптике используется при рассмотрении световых пучков с фазовой сингулярностью. Спиновый угловой момент связывают с поляризацией светового пучка, а орбитальный угловой момент – с профилем волнового фронта и топологическим зарядом [1, 2]. Спин-орбитальное взаимодействие заключается в одновременном изменении поляризации и топологического заряда и реализуется в неоднородных или анизотропных средах, например, при нормальном падении бесселева пучка на одноосный кристалл [3]. Однако, для реализации эффективного преобразования необходима толщина кристалла в несколько миллиметров – сантиметров. Поэтому представляет интерес переход к жидким кристаллам (ЖК),

обладающим на два – три порядка более высокой анизотропией. При этом использование эффекта Фредерикса, связанного с переориентацией директора ЖК под действием электрического поля, позволяет рассчитывать на управление спин-орбитальным взаимодействием.

В настоящей работе исследованы особенности преобразования спиновой и орбитальной составляющих углового момента бесселева светового пучка при его распространении в электрически управляемой ЖК ячейке с толщиной слоя ЖК 20 мкм.

Для изучения особенностей преобразования бесселева светового пучка в зависимости от величины управляющего напряжения проанализировано изменение распределения интенсивности выходного поля в дальней зоне в схеме со скрещенными поляризатором и анализатором. В отсутствие электрического поля имеем малоинтенсивное кольцевое распределение, характерное для бесселева пучка нулевого порядка. При увеличении напряжений до 6 В кольцевое распределение сохраняется, но интенсивность существенно увеличивается, что объясняется изменением состояния поляризации. При напряжении 8 В появляются два разрыва вверху и внизу кольца, а при напряжениях выше 10 В формируются четыре сектора, что говорит о начале реализации спин-орбитального преобразования и получении пучком орбитального углового момента равного двум. При дальнейшем увеличении напряжения сектора становятся более симметричными и начиная с 20 В расположение секторов практически не меняется. Такой сценарий изменения пространственного распределения интенсивности хорошо согласуется с зависимостью энергетического коэффициента преобразования в ортогональную поляризационную компоненту, измеренного в скрещенных поляризаторах.

Таким образом, полученные результаты иллюстрируют возможности использования ЖК для преобразования поляризационной, фазовой и пространственной структуры бесселевых световых пучков. Преобразование части бесселева светового пучка нулевого порядка в пучок второго порядка и их последующее взаимодействие представляет интерес для решения задач оптической микроскопии при формировании бездифракционных световых пучков с заданными характеристиками.

Список литературы

1. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. // Phys. Rev. A. 1992. V.45. P.8185–8189.
2. Liberman V., Zeldovich B. // Phys. Rev. A. 1992. V.46. P.5199–5207.
3. Belyi V.N., Khilo N.A., Kazak N.S., Ryzhevich A.A., Forbes A. // Optical Engineering. 2011. V.50. P.059001.

А.А. КУТАНОВ, Н. СЫДЫК УУЛУ, С.С. ВЕЛИКАСОВ¹
*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,
Кыргызская Республика*
¹*Кыргызско-Российский славянский университет им. Б.Н. Ельцина, Бишкек,
Кыргызская Республика*

ТРЕХМЕРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ НА СЛОЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Представлены результаты трехмерной лазерной записи на слое аморфного кремния интерференционного фильтра сфокусированным излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 405$ nm. Прямая лазерная запись проводилась на слое аморфного кремния толщиной $\sim 1-2$ мкм при изменении глубины фокуса записи в объеме регистрирующей среды. При локальном воздействии сфокусированным излучением на слой аморфного кремния наносекундными импульсами происходит его переход в кристаллическое состояние. За счет рассеяния света на оптических неоднородностях среды после лазерной записи и различной фазы рассеянных волн можно наблюдать трехмерные сцены для глаз человека. Предложенный способ трехмерной лазерной записи на a-Si привлекателен для создания 3D принтера изображений.

A.A. KUTANOV, N. SYDYK UULU, S.S. VELIKASOV¹
*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of NAS KR,
Bishkek, Kyrgyz Republic*
¹*Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, Bishkek, Kyrgyz Republic*

3D LASER RECORDING ON AMORPHOUS SILICON LAYER

The results of three-dimensional laser recording on the amorphous silicon layer of the interference filter by focused radiation from a semiconductor laser with $\lambda = 405$ nm is demonstrated. Direct laser recording was carried out to the amorphous silicon layer with a thickness of $\sim 1-2$ μm under change in the depth of the recording focus in the recording medium volume. Local amorphous silicon transition to a crystalline state occurs under interaction of focused radiation to a a-Si layer with nanosecond pulses. Due to light scattering on optical inhomogeneities after laser recording on a-Si layer and different phase of the scattered waves, the three-dimensional scenes are well observed for human eyes. This method of 3D laser recording on a-Si is attractive for creating a 3D image printer.

Разработаны интерференционные фильтры, полученные методом магнетронного нанесения пленок аморфного кремния на предварительно

нанесенный металлический слой на стеклянной подложке [1, 2]. Целью работы являлось экспериментальное исследование возможностей трехмерной лазерной записи в объеме слоя аморфного кремния под действием наносекундных импульсов сфокусированного излучения. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Для прямой записи на аморфном кремнии использовался одномодовый полупроводниковый лазер с $\lambda = 405 \text{ нм}$ мощностью 120 мВт. Лазерный луч коллимировался асферической линзой, а затем фокусировался микро объективом на регистрирующую среду. Глубина фокуса изменялась для записи отдельных фрагментов изображения. Компьютер контролировал длительность лазерных импульсов, их частоту, и движение координатного стола. Для прямой лазерной записи использовались пленки аморфного кремния различной толщины $\sim 1\text{-}2 \text{ мкм}$. При взаимодействии сфокусированного лазерного луча на слой a-Si происходит локальная кристаллизация и формирование рельефной структуры [2].

За счет рассеяния света на оптических неоднородностях возникших при трехмерной лазерной записи и локального изменения показателя преломления среды, можно наблюдать для глаз человека трехмерные сцены за счет различной фазы рассеянных волн (рис. 2). Предложенный способ трехмерной лазерной записи на a-Si привлекателен для создания 3D принтера изображений.

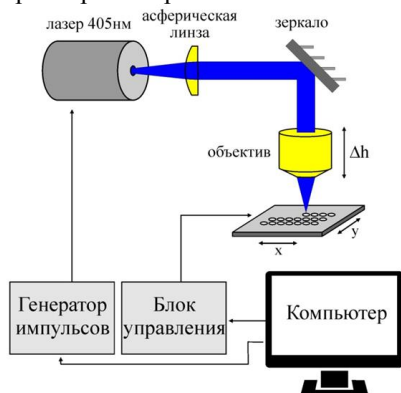


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

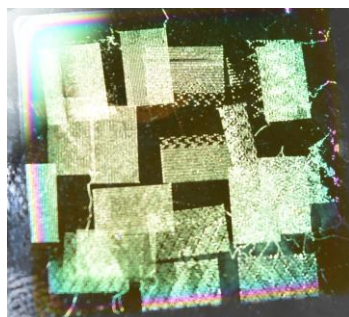


Рис. 2. Фотография 3D изображения записанного на a-Si

Список литературы

1. Kutanov A.A., Snimshikov I., Sydyk uulu N. // Physics Procedia 2015. V.73. P.82-86.
2. Kutanov A.A., et al. // Journal of Physics: Conf. Ser. 2016. V.737. P.012025.

С.Г. КАЛЕНКОВ, Г.С. КАЛЕНКОВ¹, А.Е. ШТАНЬКО²

Московский политехнический университет

¹*ООО «Микроголо», Москва*

²*Московский государственный технологический университет «Станкин»*

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ МИКРООБЪЕКТОВ В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Приведены теоретические и экспериментальные результаты по регистрации цифровых гиперспектральных голограмм. Показано, что оптическая схема фурье-спектрометра является цифровым аналогом записи Липпмановских фотографий и голограмм Денисюка в некогерентном свете.

S.G. KALENKOV, G.S. KALENKOV¹, A.E. SHTANKO²

Moscow Polytechnic University

¹*Microholo Ltd, Moscow*

²*Moscow State University of Technology (Stankin)*

HYPERSPECTRAL HOLOGRAPHY OF MICROOBJECTS IN NON-COHERENT LIGHT

Theoretical and experimental results on the registration of digital hyperspectral holograms are presented. It is shown that the optical scheme of a Fourier spectrometer is a digital analog of recording Lippmann photographs and Denisjuk holograms in incoherent light.

В наших работах [1, 2] впервые предложено и экспериментально подтверждено новое направление в оптике: способ записи цифровых гиперспектральных голограмм микрообъектов в некогерентном свете. Предложенный способ основан на принципах и технике фурье-спектроскопии. Известны изображающие FT-спектрометры с 2D-матрицей, в которых исследуемый образец помещен в сведённых вместе пучках, что соответствует регистрации так называемой симметричной интерферограммы. В этих спектрометрах изображение объекта (картина интенсивности) формируется на матрице с помощью объектива и, затем, в каждом пикселе матрицы (и соответственно в каждой точке изображения) вычисляется спектр. Особый интерес представляет собой схема записи несимметричной интерферограммы (рис. 1). Формально эта схема совпадает с принципиальной схемой записи голограммы. Мы показали, что фурье-преобразование интерферограммы в каждом пикселе матрицы дает комплексную амплитуду объектного поля на каждой спектральной частоте,

т.е. гиперспектральную голограмму: как френелевского типа, когда дифракционное поле объекта непосредственно падает на приемную матрицу (объектив L убран), так и сфокусированного изображения, когда объектив L строит изображение объекта на матрице [3]. В этих работах мы экспериментально исследовали продольную и поперечную разрешающую способность метода. На примере штриховой миры показано, что его разрешающая способность соответствует дифракционному пределу. Экспериментально подтверждена возможность существенного подавления спекл-шума. Для некоторых микрообъектов продемонстрирована возможность численного синтеза гиперспектрального (цветного) изображения. На макете, в состав которого вошел микроскоп классического типа, были получены гиперспектральные изображения микрообъектов с предельным продольным и поперечным разрешением. В [3] нами развита теория записи гиперспектральных френелевских голограмм объектов в схеме на отражение и приведены результаты последних исследований по регистрации гиперспектральных голограмм биообъектов.

Спектральный анализ двумерных картин интенсивности изображающего FT-спектрометра, по существу, совпадает с методом получения цветных Липпмановских фотографий. Но что самое главное, мы показали, что гиперспектральные голограммы, полученные путем фурье-преобразования несимметричных интерферограмм, записанных в каждом пикселе 2D матрице FT-спектрометра, принципиально совпадает со схемой записи голограмм во встречных пучках, предложенной Ю.Н. Денисюком. Таким образом, фурье-спектрометр, снабженный 2D-матрицей регистрации, является не только спектральным прибором, но, как мы показали, способен на гораздо большее: он является цифровым аналогом регистрации гиперспектральных голограмм Денисюка в некогерентном свете.

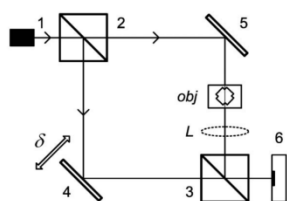


Рис. 1. Принципиальная схема несимметричной интерферограммы

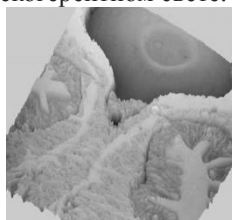


Рис. 2. Гиперспектральный фазовый профиль среза червя в ИК-диапазоне

Список литературы

1. Kalenkov S.G, et. al. // Quantum Electronics. 2015. V.45(8). P.333-338.
2. Kalenkov S.G, et. al. // Optics Express. 2013. V.21. P.24985-24990.
3. Kalenkov S.G, et. al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2017. V.34. P.B49-B55.

А.Н. ПУТИЛИН, А.В. МОРОЗОВ¹, В.В. ДРУЖИН², А.О. ЖИРКОВ

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

¹Исследовательский центр Самсунг, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ НМД-ДИСПЛЕИ

В статье приводятся результаты исследования записи голографических оптических элементов для использования в схемах виртуальных дисплеев (VR), в частности, в наголовных дисплеях (HMD). Рассматриваются различные типы голограмм, выполняющие роль устройств совмещения (beam combiners), осветительных элементов для LCD и LCOS матриц в схемах дисплеев дополненной реальности.

A.N. PUTILIN, A.V. MOROZOV¹, V.V. DRUZHIN², A.O. ZHIRKOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Samsung Research Center, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University

HOLOGRAPHIC HMD DISPLAYS

The article concerns the results of investigation of holographic optical elements recording for application in virtual displays (VR), in particular, in head mounted displays (HMD). Various types of holograms are considered, they can be used as an optical beam combiners, illumination elements for LCD and LCOS in the augmented reality display circuits.

Одним из наиболее важных элементов VR дисплеев является «Beam Combiner» (BC) – элемент совмещения локальной информации, формируемой приватным источником информации с окружающей пользователя VR дисплея обстановкой [1]. Практически критическим параметром BC является его продольный размер. При определении требований к FOV VR можно определить и блокируемые области окружающей обстановки, так, для традиционных делительных кубиков, используемых как BC и при FOV порядка 25⁰ блокирующие области занимают не менее 9⁰ по сторонам основного поля зрения, потеря такого пространства для оператора НМД совершенно недопустимы. Исследуемые в данной работе голографические неосевые BC (рис. 1) свободны от таких недостатков.

Целью работы является экспериментальное исследование записи внеосевых голографических линз с FOV до 90⁰. Записывались брегговские

RGB линзы (записывающие длины волн 635, 532 и 471 нм) на материале Bayfol фирмы COVESTRO. Угловая селективность голограмм не превышала 12° . Для схем осветителей VR дисплеев записывались волноводные голограммы, позволяющие достичь полного разделения дифрагированных в свободное пространство полезных лучей и недифрагированных лучей, ограниченных ПВО распространением в объеме волновода [2]. Применение раздельной записи нескольких голограмм, работающих каждая в своем спектральном диапазоне, позволяет компенсировать большинство хроматических aberrаций (рис. 2). В исследуемой схеме могли применяться лазерные источники света и светодиодные источники с дополнительными интерференционными фильтрами с шириной спектра не более 3 нм, записанные полихроматические голограммы формировали полноцветное изображение HD качества в поле более 50° . Световая эффективность интегрального осветителя достигала 30 %, толщина 2.5 мм.

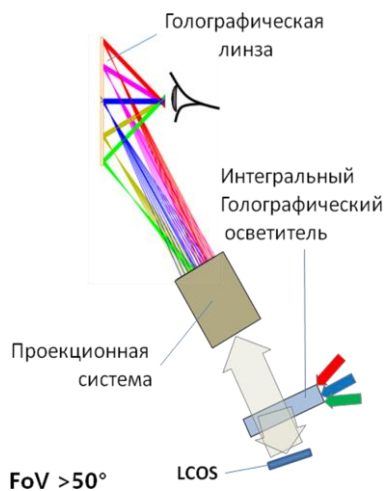


Рис. 1. Схема HMD с голографическими элементами

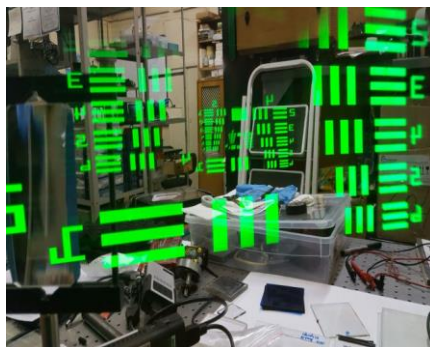


Рис. 2. Фотография изображения HMD - тест таблица (зеленый цвет)

Список литературы

1. Cakmakci O. Head-Worn Displays // Journal of Display Technology. 2006. V.2 (3). P.199-216.
2. Kim S.I., Choi C.S., Morozov A., Dubynin S., Dubinin G., An J., Lee S.H., Kim Y. Slim coherent backlight unit for holographic display using full color holographic optical element // Optics Express. 2017. V.25 (22). P.26781-26791.

И.В. КРАСНИКОВ, А.Ю. СЕТЕЙКИН, Б. РОТ¹,
М. МЕЙНХАРДТ-ВОЛВЕБЕР¹

Амурский государственный университет, Благовещенск
¹Ганноверский университет им. Г.В. Лейбница, Германия

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ С ФИКСИРОВАННОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ПРИ КОНФОКАЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ В БИОТКАНЯХ

Рамановская спектроскопия может использоваться для получения детальной информации об образце биологической ткани. Целью настоящей работы является введение эффективного метода моделирования спектроскопии комбинационного рассеяния в мутных (рассеянных) средах с учетом соответствующих параметров детектора и объема выборки. Процесс движения фотонов в мутной биологической среде моделируется с помощью метода Монте-Карло.

I.V. KRASNIKOV, A.Yu. SETEIKIN, B. ROTH¹,
M. MEINHARDT-WOLLWEBER¹

Amur State University, Blagoveshchensk
¹Leibniz University, Hannover, Germany

MONTE CARLO SIMULATION OF RAMAN SCATTERING WITH DETERMINATED WAVELENGTH IN CONFOCAL MICROSCOPY IN BIOLOGICAL MEDIA

Raman spectroscopy can be employed to measure the chemical composition of a sample, which can in turn be used to extract biological information. The aim of this paper is to introduce an efficient simulation technique for Raman spectroscopy in turbid (scattering) media taking into account relevant detector parameters and the sampling volume. We simulate the process of photon motion in turbid media by means of the Monte Carlo method.

Анализ биологических тканей с помощью индуцированных светом оптических сигналов широко используется в различных медицинских, диагностических и терапевтических целях. Одним из инструментов молекулярного оптического анализа является конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния, которая позволяет регистрировать неупруго рассеянные фотоны в среде. Разница энергии для каждого неупруго рассеянного фотона соответствует молекулярной структуре

определенного исследуемого образца. Таким образом, колебания молекул каждого из компонент производят характерный спектр комбинационного рассеяния или своеобразные «отпечатки пальцев», которые могут быть использованы для определения химического и структурного состава образца [1]. На сегодняшний день существует две основные причины, почему задача надежного количественного определения величины затухания сигнала комбинационного рассеяния не может быть решена удовлетворительно: отсутствие адекватных моделей и надежных инструментов моделирования, с одной стороны, и недостаточные знания о влиянии оптических свойств и распределения рассеивателей в образце, с другой [2].

В данной работе мы использовали методы и алгоритмы, основанные на хорошо известной реализации метода МК для рассеяния фотонов в мутных средах, разработанного Wang [3], с использованием технологии NVidia CUDA для минимизации времени расчета. Метод основан на принципах моделирования флуоресценции, при этом распространение фотонов возбуждения моделируется классическим алгоритмом Монте-Карло [4, 5]. Из представленных результатов можно сделать вывод, что используемые в работе подходы к моделированию распространения комбинационно рассеянного излучения в мутных средах дают хорошие результаты. Результаты моделирования показывают, что сильное рассеяние типичного биологического образца, изучаемого с помощью комбинационного рассеяния, вносит существенные изменения в профиль обнаруженного сигнала. Высокое рассеяние, а также коэффициенты поглощения объема выборки приводят к существенному снижению сигнала комбинационного рассеяния на детекторе. Это необходимо учитывать при разработке рамановских установок и оценке реалистичных измерений.

Список литературы

1. Shih W.-C., Bechtel K.L., Feld M.S. Intrinsic Raman spectroscopy for quantitative biological spectroscopy. Part I: Theory and simulations // Opt Express. 2008. V.16(17). P.12726.
2. Meglinski I., Doronin A.V. Monte Carlo modeling for the needs of biophotonics and biomedical optics // Advanced Biophotonics: tissue optical sectioning / ed. by V.V. Tuchin, R.K. Wang. Taylor & Francis, 2012.
3. Wang L.H., Jacques S.L., Zheng L.Q. MCML Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues // Comput. Methods Programs Biomed. 1995. V.47. P.131-146.
4. Wang S., Zhao J., Lui H., He Q., Bai J., Zeng H. Monte Carlo simulation of in vivo Raman spectral Measurements of human skin with a multi-layered tissue optical model // J. Biophotonics. 2014. V.7(9). P.703-715.
5. Welch A.J., Gardner C., Richards-Kortum R., Chan E., Criswell G., Pfefer J., Warren S. Propagation of Fluorescent Light // Lasers in Surgery and Medicine. 1997. V.21. P.166–178.

К.В. ЛЬВОВ^{1,2}, С.Ю. СТРЕМОУХОВ^{1,2}, Ф.В. ПОТЕМКИН¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

ВЛИЯНИЕ РАМАНОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ СУПЕРКОНТИНУУМА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Проведено теоретическое исследование процесса генерации суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона в конденсированных средах. Определено влияние рамановской нелинейности на поведение спектра суперконтинуума и временного профиля импульса при положительной и отрицательной дисперсии групповой скорости.

K.V. LVOV^{1,2}, S.Yu. STREMOUKHOV^{1,2}, F.V. POTEMKIN¹

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow*

RAMAN NONLINEARITY CONTRIBUTION TO SUPERCONTINUUM GENERATION UNDER FILAMENTATION IN CONDENSED MEDIA

Were performed theoretical investigation of supercontinuum generation under filamentation of femtosecond near-IR radiation in condensed media. Were determined Raman nonlinearity contribution to supercontinuum spectrum and temporal pulse profile under normal and anomalous group velocity dispersion.

Излучение суперконтинуума, благодаря гладкости спектра и его протяженности от видимого до среднего ИК-диапазона, имеет множество практических применений, среди которых можно выделить многофотонную микроскопию [1], генерацию ультракоротких (несколько фемтосекунд) импульсов [2]. Кроме того, суперконтинуум используют в качестве затравочного излучения в параметрических усилителях при производстве мощных фемтосекундных (субтераваттных) лазерных систем среднего ИК-диапазона [3]. Поэтому изучение природы генерации суперконтинуума, а также развитие методов управления параметрами генерируемого излучения представляет как фундаментальный, так и практический интерес.

В настоящее время наименее изученным эффектом при генерации суперконтинуума оказывается влияние рамановской нелинейности на

параметры генерируемого излучения [4, 5]. Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния рамановской нелинейности на спектр суперконтинуума и временной профиль импульса.

В результате проведения серии численных исследований, основанных на решении задачи распространения лазерного излучения в режиме филаментации с учетом нелинейных эффектов, в том числе рамановской и керровской нелинейностей, генерации плазмы и многофотонного поглощения, были получены следующие результаты. Показано, что учет рамановской нелинейности приводит к асимметричному поведению временного профиля импульса: образуется ударный передний фронт, который распространяется на большее, по сравнению с задним фронтом, расстояние (рис. 1). В среде с положительной дисперсией групповой скорости (ДГС) за формирование красной части спектра суперконтинуума отвечает задний фронт импульса, в среде с отрицательной ДГС – передний фронт. Поэтому учет рамановской нелинейности приводит к подавлению уширения спектра суперконтинуума в красную область в среде с положительной ДГС (рис. 1) и усилению этого эффекта при отрицательной ДГС (рис. 2).

Рамановский вклад на уровне 0 (слева) и 0.4 (справа)

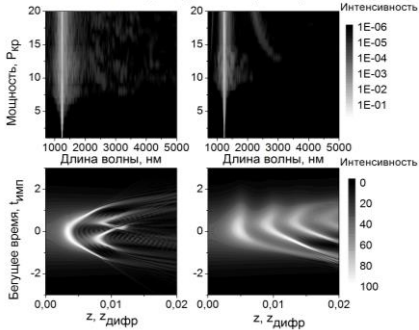


Рис. 1. Спектры суперконтинуума (вверху) и временные профили импульса (внизу) при положительной ДГС

Рамановский вклад на уровне 0 (слева) и 0.2 (справа)

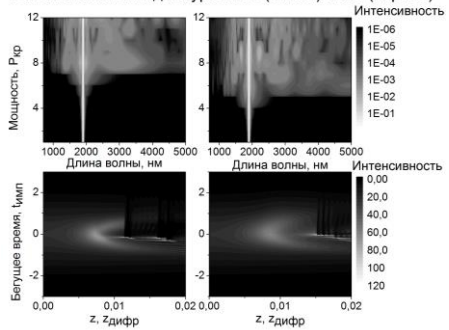


Рис. 2. Спектры суперконтинуума (вверху) и временные профили импульса (внизу) при отрицательной ДГС

Список литературы

1. Murtz M., Hering P. // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. 2008. P.535-555.
2. Chekalin S.V. et. al. // Quantum Electronics. 2017. V.47 (3). P.252-258.
3. Potemkin F.V. et al. // Laser Phys. Lett. 2016. V.13.
4. Jukna V. et al. // Appl. Phys. B. 2014. V.116 (2). P.477-483.
5. Garejev N. et al. // Journal of the Optical Society of America B. 2017. V.34 (1).

А.И. МАЙМИСТОВ, А.А. ДОВГИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»***РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ В БИНАРНОМ МАССИВЕ
ЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВОДОВ**

Рассматривается бинарная (двухкомпонентная) цепочка волноводов, которая образована либо из одинаковых волноводов, но с чередованием расстояния между соседними волноводами, либо из волноводов с положительным показателем преломления, но имеющих некоторое различие (показатель преломления или толщина волновода). Получено точное решение уравнений связанных волн, которое описывает распределение полей по волноводам и дискретную дифракцию в данной модели.

A.I. MAIMISTOV, A.A. DOVGIY

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)***FIELD DISTRIBUTION
INTO BINARY LINEAR WAVEGUIDE ARRAY**

The binary (two-component) linear waveguide array that is formed either from identical waveguides but with alternating distances between adjacent waveguides, or waveguides with a positive refractive index, but having distinctions in the refractive index or the waveguide thickness. The exact solution of the coupled wave equations describing the field distribution over waveguides is found. These solutions describe the discrete diffraction in the model under consideration

Здесь будет рассматриваться бинарная (двухкомпонентная) цепочка волноводов, которая образована либо из волноводов с различными показателями преломления, либо из одинаковых волноводов, но с чередованием расстояния между соседними волноводами, либо из волноводов с положительным показателем преломления, но имеющих некоторое различие (показатель преломления или толщина волновода) Элементарная ячейка содержит типа два узлов – тип А и тип В. В приближении медленно меняющихся амплитуд изменения напряженности электрических полей непрерывного электромагнитного излучения в волноводе каждого типа, определяются системой уравнений,

$$i\partial_{\zeta} A_n = B_n + B_{n-1}, \quad i\partial_{\zeta} B_n = A_n + A_{n+1}. \quad (1)$$

Здесь A_n и B_n – нормированные амплитуды полей в волноводе n -той элементарной ячейки, ζ – безразмерная координата, пройденное излучением расстояние в волноводе, измеренное в единицах длины связи [1]. Решение уравнений (1) можно получить, определив производящие функции

$$P_A(\zeta, y) = \sum_n A_n(\zeta) e^{iny}, \quad P_B(\zeta, y) = \sum_n B_n(\zeta) e^{iny},$$

которые удовлетворяют линейным уравнениям второго порядка, полученным из (1):

$$i\partial_\zeta P_A = (1 + e^{iy})P_B, \quad i\partial_\zeta P_B = (1 + e^{-iy})P_A. \quad (2)$$

Выбрав желаемые начальные условия $A_n(0)$ и $B_n(0)$, можно решить эту систему уравнений и воспользовавшись разложениями (2), записать $A_n(\zeta)$ и $B_n(\zeta)$ для любого значения ζ . В простейшем случае, когда $A_n(0) = A_0 \delta_{n0}$ и $B_n(0) = 0$, можно найти следующее распределение напряженностей полей по волноводам

$$A_n(\zeta) = A_0 (-1)^n J_{2n}(2\zeta), \quad B_n(\zeta) = -iA_0 (-1)^n J_{2n+1}(2\zeta),$$

где $J_p(2\zeta)$ – функции Бесселя p -того порядка. Это распределение напряженностей полей описывает дискретную дифракцию в бинарном массиве волноводов. Для более сложных случаев начальных условий, выражения для электрических полей в волноводах содержат слагаемые, учитывающие интерференцию полей в соседних волноводах. Надо заметить, что если начальные условия выбраны в виде $A_n(0) = (-1)^n A_0$ и $B_n(0) = (-1)^n B_0$, то дифракция отсутствует. Но плоской зоны [2] в спектре линейных волн нет, так как число узлов в элементарной ячейке меньше трех.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-02-02764).

Список литературы

1. Maimistov A.I., Gabitov I.R. // Eur. Phys.J. Special Topics. 2007. V.147. P.265.
2. Flach S., Leykam D., Bodyfelt J.D., Matthies P., Desyatnikov A.S. // Europhys. Lett. 2014. V.105, P.30001.

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

УСИЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Предложен и реализован метод изготовления фотонно-кристаллических микрорезонаторов (МР) на основе пористого кварца с наночастицами серебра, с плавным изменением спектрального положения МР моды в зависимости от координаты на образце. Экспериментально и теоретически исследованы линейные спектры отражения таких структур, а также спектры интенсивности оптической второй гармоники (ВГ). Усиление генерации ВГ достигалось за счёт совмещения плазмонного резонанса наночастиц серебра и микрорезонаторной моды фотонного кристалла.

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

AMPLIFICATION OF SECOND OPTICAL HARMONIC GENERATION BY PLASMONIC NANOPARTICLES IN PHOTONIC CRYSTAL MICROCAVITY

The method of manufacturing of porous silica based photonic crystal (PhC) microresonators (MR) containing silver nanoparticles with smooth change of the spectral position of the MR mode versus coordinate of sample's area is proposed and realized. The linear reflection spectra of the structures, as well as the spectra of the optical second harmonic intensity, are experimentally and theoretically investigated. Enhancement of second harmonic generation is achieved by combing plasmon resonance of silver nanoparticles and microresonator mode of the PhC.

Нелинейно-оптический отклик большинства веществ относительно мал. Одним из методов усиления нелинейного сигнала является увеличение амплитуды лазерного поля, воздействующего на вещество. Это увеличение может достигаться, например, за счет эффективной локализации света в фотонно-кристаллических (ФК) микрорезонаторах (МР) [1] и в наночастицах при наличии плазмонного резонанса [2]. Комбинирование этих двух подходов должно многократно усилить нелинейное взаимодействие.

В работе представлены: 1) метод изготовления фотонно-кристаллических микрорезонаторов, в которых спектральное положение МР моды зависит от координаты, 2) исследование усиления генерации второй оптической гармоники (ГВГ) в МР, содержащих наночастицы серебра, в зависимости от спектрального положения частоты МР моды относительно полосы плазмонного резонанса наночастиц серебра.

ФК из пористого кварца с варьируемым спектральным положением МР моды (врезка на рис. 1б) получены путем: 1) электрохимического травления кристаллического кремния при пропускании тока с градиентом пространственного распределения плотности тока, и 2) последующим термическим окислением ФК. Предложенный подход позволяет создавать фотонные кристаллы и МР, оптические свойства которых можно плавно варьировать, выбирая пространственную область ФК.

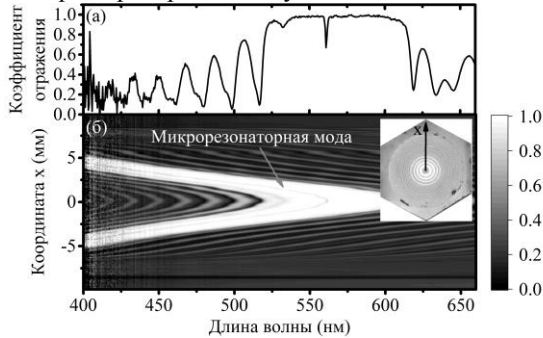


Рис. 1. Спектр отражения в центре ФК. Минимум при 560 нм соответствует МР моде (а); спектр отражения ФК в зависимости от координаты на образце (б); врезка – фотография ФК и линия сканирования спектра отражения структуры

Это продемонстрировано на примере ФК, в котором: 1) центральная часть структуры отражает свет в диапазоне длин волн 520–620 нм, а крайняя область ультрафиолетовое излучение, 2) спектральное положение МР моды изменяется на 160 нм при удалении от центра ФК на 5 мм (рис. 1). Возможность спектральной подстройки резонансной длины волны МР позволила совместить ее с длиной волны плазмонного резонанса серебряных наночастиц, внедренных внутрь МР при помощи вакуумной инфузии, для исследования усиления ГВГ.

Список литературы

1. Dolgova T.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V.81. P.2129-2140.
2. Sarid D. et al. Modern introduction to surface plasmons: theory, Mathematica modeling, and applications. Cambridge University Press, 2010.

М.Ю. ГУБИН, С.Н. КАРПОВ, А.В. ПРОХОРОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

ФОРМИРОВАНИЕ НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПЛАЗМОНОВ В СПАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрена задача управления квантовой динамикой локализованных плазмонов в спазерных системах, состоящих из металлических наночастиц (НЧ) и полупроводниковых квантовых точек (КТ) с заданной геометрией их относительного расположения. Показана возможность генерации неклассических плазмонов в процессе нелинейных ближнеполевых взаимодействий в многочастичной спазерной системе.

M. Yu. GUBIN, S. N. KARPOV, A. V. PROKHOROV

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

NONCLASSICAL LOCALIZED PLASMON STATES GENERATION IN SPASER SYSTEMS WITH APPLYING EXTERNAL MAGNETIC FIELD

The problem of control the quantum dynamics of localized plasmons in spaser systems composed of metal nanoparticles (NP) and semiconductor quantum dots (QD) with a given geometry of their relative location is considered. The possibility of generating nonclassical plasmon states resulting from the process of nonlinear near-field interactions in a multiparticle spaser system is shown.

В настоящей работе рассматривается возможность управления квантовыми статистическими и корреляционными свойствами генерируемых в многочастичном спазере [1] плазмонов. Используется модель парных диполь-дипольных взаимодействий для расположенных на малом расстоянии НЧ и полупроводниковых КТ [2, 3]. На основе квантования поля НЧ и КТ осуществлен последовательный вывод расширенного гамильтониана Джейнса-Каммингса на случай нелинейных плазмон-экситонных взаимодействий, возникающих за счет двухквантовых процессов распада биекситонных состояний [4] КТ, входящей в состав трехчастичной спазерной системы (сборки НЧ-КТ-НЧ). Нелинейный режим работы рассматриваемого устройства подразумевает значительную разность в значениях частот плазмонного резонанса в НЧ и

энергии межуровневого перехода в КТ. Внешнее управление спазерной системой может быть осуществлено посредством изменения величины внешнего магнитного поля, которое приводит к зеемановскому расщеплению и диамагнитному сдвигу энергетических уровней КТ.

Для моделирования выбраны пара сферических золотых НЧ, находящихся на характерном расстоянии 3 нм вдоль одной прямой от изготовленной из сульфида кадмия сферической КТ с диаметром 1.9 нм. Рассчитанные значения частоты Раби для взаимодействующих НЧ и КТ составят $\Omega = 2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$, тогда как величина двухквантовой частоты Раби $\Omega^{(2)} = \Omega^2 / \delta$ составит $2.6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Здесь δ является отстройкой спазерной частоты от частоты межуровневого перехода в КТ и в отсутствии магнитного поля составляет $7.58 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. При выборе величины индукции внешнего магнитного поля $B = 5 \text{ Тл}$ зеемановский сдвиг уровней КТ равен $8.35 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, что будет соответствовать появлению дополнительной экситонной отстройки $\Delta\delta = 8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ и смещению частоты двухквантового перехода на величину $\delta^{(2)} = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, изменение B приводит к значимым изменениям двухквантовой частоты Раби, что позволяет надеяться на возможность управления нелинейными процессами распада биэкситонных состояний КТ посредством магнитного поля.

На основе анализа кросс-корреляционной функции прогнозируется формирование перепутанных плазмонов в трехчастичной спазерной системе за счёт нелинейных процессов с биэкситонными состояниями в КТ. Предложена модель эффективного источника неклассических (в т.ч.) перепутанных плазмонов [5] для целей квантовой обработки информации в плазмонных схемах [6], реализуемых на субволновых масштабах с внешним управлением посредством магнитного поля [7].

Работа выполнена в рамках государственного задания ВлГУ 2017 г. в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. Stockman M.I. // J. Opt. 2010. V.12. P.024004.
2. Виноградов А.П., Андрианов Е.С. и др. // УФН. 2012. Т.182. С.1122.
3. Андрианов Е.С., Пухов А.А. и др. // Квантовая Электроника. 2015. Т.45. С.245.
4. Salter C.L., Stevenson R.M., et al. // Nature. 2010. V.465. P.594.
5. Thakkar N., Cherqui C., Masiello D.J. // ACS Photonics. 2015. V.2. P.157.
6. Lemke C., Leisner T., et al. // Nano Lett. 2014. V.14. P.2431.
7. Gubin M.Yu., Shesterikov A.V., Karpov S.N., Leksin A.Yu., Prokhorov A.V. // arXiv:1709.08548v1 [cond-mat.mes-hall]. 2017.

В.С. ПЕРЕСКОКОВ, И.В. ДЗЕДОЛИК

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГРАНИЦЫ

Приведены результаты численного моделирования процесса интерференции поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) падающих и отраженных от криволинейной границы неоднородности в металлическом слое. При отражении ППП от границы неоднородности в форме ласточкина хвоста в результате интерференции с падающими ППП образуются плазмонные вихри с винтовой дислокацией фазы в сингулярных точках поля. Положением плазмонных вихрей на поверхности металлического слоя можно управлять с помощью электростатического поля.

V.S. PERESKOKOV, I.V. DZEDOLIK

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

FORMATION OF SURFACE PLASMON-POLARITON VORTICES AT REFLECTION FROM CURVILINEAR BOUNDARY

The results of simulation of interference of the surface plasmon-polaritons (SPPs) falling and reflecting from the curvilinear boundary of inhomogeneity in the metallic layer are presented. The plasmonic vortices with a screw phase dislocation appear in the singular points of the field as a result of the SPP interference after reflection from the boundary of inhomogeneity in the dovetail form. The position of the plasmonic vortices on the surface of metallic layer can be controlled by means of the electrostatic field.

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) могут быть возбуждены на границе раздела металла с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_M < 0$ и диэлектрической среды с проницаемостью $\varepsilon_0 > 0$ [1-3]. При $\varepsilon_M < 0$ ППП распространяются вдоль поверхности металла, но при положительных значениях $\varepsilon_M > 0$ ППП не могут распространяться, т.к. не выполняются граничные условия $\varepsilon_M \alpha_0 = -\varepsilon_0 \alpha_M$ (где $\alpha_0 > 0$ и $\alpha_M > 0$ - декременты по нормальной к поверхности металла оси). При отражении от криволинейной границы неоднородности в металлическом слое изменяется кривизна волнового фронта и направление распространения ППП [4-6].

Граница неоднородности в форме ласточкиного хвоста может быть создана на поверхности металлического слоя двумя отрицательно заряженными зондами, которые изменяют диэлектрическую проницаемость металла таким образом, что она приобретает положительные значения $\varepsilon_M > 0$ в оптическом частотном диапазоне. Тогда, в области действия электростатического поля, нарушаются граничные условия распространения ППП, и они рассеиваются на границе искусственно созданной неоднородности диэлектрической проницаемости металла. В интерференционном поле падающих ППП и отраженных от криволинейной границы неоднородности диэлектрической проницаемости на поверхности металлического слоя возникают сингулярные точки с винтовой дислокацией фазы [5, 6]. Изменяя радиус окружностей ласточкина хвоста с помощью варьирования напряженности электростатического поля, можно управлять положением вихрей ППП.

На рис. 1 приведено распределение амплитуды и фазы интерференционного поля нормальной к поверхности металла компоненты вектора электрического поля.

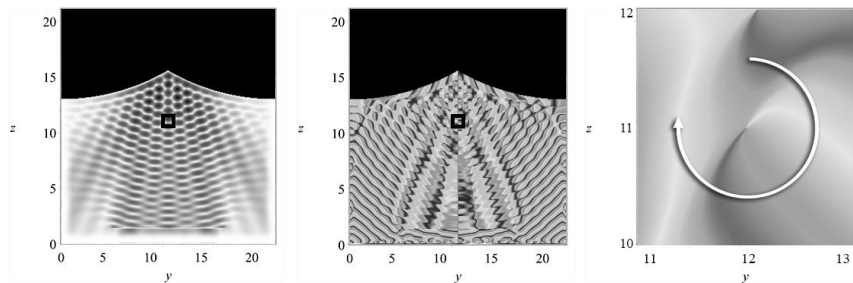


Рис. 1. Распределение нормальной к поверхности компоненты вектора электрического поля ППП при отражении от границы неоднородности в металлическом слое в форме ласточкиного хвоста: слева – интерференционные линии; в центре – распределение фазы; справа – винтовые дислокации фазы (вихри ППП); значения по осям (y, z) отложены в микрометрах

Список литературы

1. Поверхностные поляритоны / ред. В.М. Агранович, Д.Л. Миллс. М.: Наука, 1985.
2. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010.
3. Dzedolik I.V. Solitons and nonlinear waves of phonon-polaritons and plasmon-polaritons. New York: Nova Science Publishers, 2016.
4. Zhou H., Dong J., Zhou Y., et al. // IEEE Photonics J. 2015. V.7. No.4. P.4801007.
5. Dzedolik I.V., Pereskokov V.S. // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. V.33. No.5. P.1004-1009.
6. Dzedolik I.V., Lapayeva S.N., Pereskokov V.S. // J. Opt. 2016. V.18. No.7. P.074007.

Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, С.А. МЫСЛИВЕЦ^{1,2}, С.Е. СВЯХОВСКИЙ³,
 С.А. ЕВЛАШИН⁴, А.М. ВЬЮНЬШЕВ^{1,2}, П.С. ПАНКИН^{1,2},
 И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}, С.Я. ВЕТРОВ^{1,2}, В.Г. АРХИПКИН^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

³*Московский государственный университет им М.В. Ломоносова*

⁴*Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.*

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТАММОВСКИЙ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОН

В работе исследован широкополосный таммовский плазмон-поляритон, локализованный на границе раздела брэгговское зеркало - тонкий металлический слой. Эффект предсказан аналитически и реализован экспериментально. Измеренные спектры отражения и пропускания согласуются с результатами расчета. Исследованную структуру предлагается использовать в качестве поглотителя на основе таммовского плазмон-поляритона.

R.G. BIKBAEV^{1,2}, S.A. MYSLIVETS^{1,2}, S.E. SVYAKHOVSKIY³,
 S.A. EVLASHIN⁴, A.M. VYUNISHEV^{1,2}, P.S. PANKIN^{1,2},
 I.V. TIMOFEEV^{1,2}, S.Ya. VETROV^{1,2}, V.G. ARKHIPKIN^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

³*Lomonosov Moscow State University*

⁴*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region*

BROADBAND TAMM PLASMON-POLARITON

We have investigated a broadband Tamm plasmon-polariton localized at the interface between a Bragg mirror and a thin metal layer. The effect is predicted analytically and implemented experimentally. The measured spectral reflectance and transmittance coefficients agree well with numerical calculations. The structure is proposed as absorber based on Tamm plasmon-polariton.

В последние годы активно исследуется особый тип поверхностного электромагнитного состояния, которое можно возбудить при нормальном падении света – таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [1]. Такое состояние является аналогом таммовского поверхностного состояния в физике твердого тела. ТПП может возбуждаться на границе брэгговского

зеркала (БЗ) и среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью $\text{Re } \varepsilon < 0$ [2].

Рассматриваемая нами структура представляет собой брэгговское зеркало, элементарная ячейка которого сформирована из чередующихся слоев пористого кварца. Методом электрохимического травления [3] была изготовлена серия БЗ, на которые был нанесен слой хрома. Серия образцов отличалась толщиной слоя хрома. Спектры отражения исследуемой структуры изображены на рис. 1а.

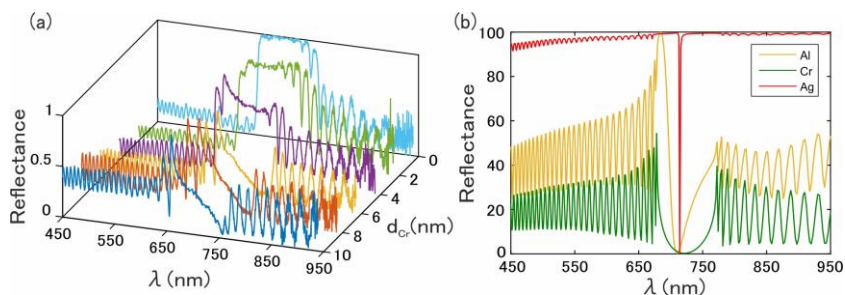


Рис. 1. Экспериментальные спектры отражения структуры при различных значениях толщины слоя хрома (а) и расчетные спектры отражения образцов при варьировании материала металлической пленки; $d_{Al} = d_{Cr} = 6$ нм, $d_{Ag} = 50$ нм (б)

Из рис. 1а видно, что последовательное увеличение толщины слоя хрома приводит к формированию у длинноволнового края запрещенной зоны области с близким к нулю коэффициентом отражения. Данная область длин волн соответствует таммовскому плазмон-поляритону, локализованному на границе брэгговского зеркала и пленки хрома. Численный расчет спектров отражения структуры (рис. 1б) показал, что использование алюминия и серебра, в качестве материала металлической пленки, приводят к уменьшению ширины спектральной линии и, как следствие, увеличению добротности ТПП. При условии оптимальной связи [4], ТПП позволяет полностью подавить отражение и максимизировать поглощение. Понижение добротности ТПП увеличивает рабочий интервал длин волн. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-02-01100.

Список литературы

1. Kalitevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V.76. P.165415.
2. Vetrov S.Ya., Bikbaev R. G., Timofeev I.V. // JETP. 2013. V.117. P.988.
3. Svyakhovskiy S.E., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V.112. P.013106.
4. Yang Z.-Y., et al. // ACS Photonics. 2017. V.4. P.221219.

Е.В. КАЗАНЦЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЛЯРИТОНОВ В НЕИДЕАЛЬНОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКЕ

В работе проводилось численное исследование устойчивости поляритонов, нелинейных связанных уединённых волн напряжённости электрического поля и поляризации нелинейной среды, распространяющихся в брэгговской решётке со случайной отстройкой параметра решётки от среднего значения. Отклонения волнового вектора решетки от условия точного резонанса возникают из-за неидеальной периодичности решётки. В уравнениях рассматриваемой модели этот эффект учитывается случайными изменениями фаз компонент электромагнитного импульса. Результаты численного моделирования показали, что такие флуктуации фаз приводят к периодическим изменениям (с периодом 2π) соотношения амплитуды и ширины поляритона, которое постоянно в идеальной нелинейной брэгговской решётке. Осцилляции соотношения амплитуды и ширины поляритона уменьшаются с увеличением расстояния, пройденного поляритонной уединённой волной в неидеальной нелинейной брэгговской решётке.

E. V. KAZANTSEVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

POLARITON PROPAGATION IN IMPERFECT BRAGG GRATING

Numerical study of stability of polariton, nonlinear coupled solitary wave of electric field and polarization of nonlinear medium, propagating in a Bragg grating with random lattice spacing is performed. Variation of lattice periodicity is a reason of appearance of random fluctuations in the phases of coupled components of the electric field of polariton. The results of numerical simulations show that these phase fluctuations lead to periodic oscillations (with the period 2π) in the ratio of the amplitude and the width of polariton. This ratio is a constant in the perfect periodic nonlinear Bragg grating. Oscillations in the ratio of the amplitude and the width of polaritonic solitary wave decrease with its propagation in imperfect nonlinear Bragg grating.

Брэгговские решётки могут быть изготовлены при экспозиции стоячих волн лазерного излучения на нанесённом на оптический волновод прозрачном фоторезистивном слое с последующим травлением неэкспонированных участков, или методами химического осаждения слоёв. В процессе производства возникают отклонения периодов решётки

от среднего значения. В работах [1, 2] рассматривалось распространение уединённых волн в идеально периодической структуре, содержащей неоднородность плотности резонансных атомов нелинейной среды. Здесь рассматривается феноменологическая модель, которая учитывает возникающие из-за флуктуаций периодичности получаемой структуры фазовые отклонения медленно меняющихся огибающих прямой и обратной волн с нормированными амплитудами e_1 и e_2 напряжённости электрического поля, взаимодействующих с нелинейной средой через её поляризацию с нормированной амплитудой p :

$$i\left(\frac{\partial e_1}{\partial \zeta} + \frac{\partial e_1}{\partial \tau}\right) + \delta e_1 = -p \exp(i\varphi(\zeta)), i\left(\frac{\partial e_2}{\partial \zeta} - \frac{\partial e_2}{\partial \tau}\right) - \delta e_2 = p \exp(-i\varphi(\zeta)),$$

$$i\frac{\partial p}{\partial \tau} + \Delta p + \mu|p|^2 p = -(e_1 \exp(-i\varphi(\zeta)) + e_2 \exp(i\varphi(\zeta))), \quad (1)$$

$\delta = 2(c/\omega_p)\Delta q_0$, $\Delta q_0 = 2k_0 - q_0$, $q_0 = 2\pi/a_0$ - среднее значение волнового вектора решётки со средним значением параметра решётки a_0 .

$\varphi(\zeta) = 2\pi a_0^{-2} \int_0^\zeta \delta\alpha(\xi) d\xi \ll 1$ - случайная фаза. Фазовый шум предполагался гауссовым и дельта-коррелированным, корреляция между фазами в двух точках $\langle \varphi(\zeta_1)\varphi(\zeta_2) \rangle = D\delta(\zeta_1 - \zeta_2)$, где D - дисперсия случайной фазы $D = \sigma^2$, σ - стандартное отклонение фазы. Параметры в численном моделировании заданы условиями $\delta = 2k_0 - q_0 = 0$. $\Delta = 0$, $\mu = 1$, $\alpha = 1,5$ - параметр, характеризующий уединённую волну.

Результаты численного моделирования показали, что соотношение между амплитудой и шириной импульса становится почти постоянным на больших расстояниях и отличается от начального на 10 % для компонент импульса e_2 и p , а для e_1 - на 5% при $\sigma = 0,3$. Различие между уединёнными волнами, распространяющимися в идеально периодической решётке и слабо неперидической, такой, что $\sigma = 0,1$ для фаз, мало. Численное моделирование проводилось автором на постдок-стажировке в США в Университете Аризоны на кафедре математики.

Список литературы

1. Kazantseva E.V., Maimistov A.I. // Phys. Rev. A 2009. V.79. P.033812.
2. Казанцева Е.В. // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С.169-170.

М.С. БЫЛИНА, С.Ф. ГЛАГОЛЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
ОСНОВНОЙ МОДЫ В ОДНОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ
С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

В работе предложена методика расчета распределения напряженностей электрического и магнитного полей основной моды в поперечном сечении одномодового волокна с осесимметричным профилем показателя преломления.

M.S. BYLINA, S.F. GLAGOLEV

*Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications***MODEL OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD
OF THE SINGLE-MODE FIBER WITH THE AXISYMMETRIC
PROFILE OF THE REFRACTION INDEX**

In this paper presents a method for calculating the distribution of the electric and magnetic field intensity in the cross section of a single-mode fiber with an axisymmetric refractive index profile.

Напряженности электрического E и магнитного H полей мод в слабонаправляющем оптическом волокне (ОВ) с осесимметричным профилем показателя преломления (ППП) можно представить в виде [1].

$$E = E_t \exp(i\beta z), \quad H = n_{10} \sqrt{\varepsilon_0 / \mu_0} E_t \exp(i\beta z), \quad E_t(r, \varphi) = E_{\max} R(r) \cdot \exp(i l \varphi), \quad (1)$$

где r, φ, z – цилиндрические координаты, β – постоянная распространения, l – азимутальный порядок моды, n_{10} – показатель преломления (ПП) ОВ на оптической оси, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, i – мнимая единица. Таким образом, для расчета полей мод достаточно найти функцию $R(r)$, которая является решением скалярного волнового уравнения:

$$d^2 R / dr^2 + (1/r) (dR / dr) + (k^2 \cdot n^2(r) - \beta^2 - l^2 / r^2) R = 0, \quad (2)$$

где $n(r)$ – профиль показателя преломления.

Непосредственное решение (2) осложняется тем, что ПП n зависит от r . Предлагаемая методика основана на представлении реального ОВ с

произвольным осесимметричным ППП структурой из N concentрических слоев, в которой каждый слой имеет ПП n_i и характеризуется своим радиусом r_i [2, 3]. Для такого ОВ функция $R(r)$ в i -ом слое имеет вид:

$$R_i(r) = A_i Z_{I1}(k_i |r|) + B_i Z_{I2}(k_i |r|), \quad k_i = \sqrt{k^2 n_i^2 - \beta^2} \quad (3)$$

где k – волновое число, J_l и Y_l – функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, I_l и K_l – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, A_i и B_i – амплитудные коэффициенты, для Z_{I1} и Z_{I2} справедливо:

$$Z_{I1}(k_i |r|) = \begin{cases} J_l(k_i |r|), & k^2 n_i^2 - \beta^2 \geq 0 \\ I_l(k_i |r|), & k^2 n_i^2 - \beta^2 < 0 \end{cases}, \quad Z_{I2}(k_i |r|) = \begin{cases} Y_l(k_i |r|), & k^2 n_i^2 - \beta^2 \geq 0 \\ K_l(k_i |r|), & k^2 n_i^2 - \beta^2 < 0 \end{cases}$$

A_i и B_i и постоянную распространения основной моды можно получить из граничных условий, сводящихся к непрерывности $R(r)$ и $dR(r)/dr$.

Предлагаемая методика применена для расчета параметров одномодового ОВ со смещенной дисперсией. Параметры слоев и результаты расчета $R(r)$ показаны на рис. 1.

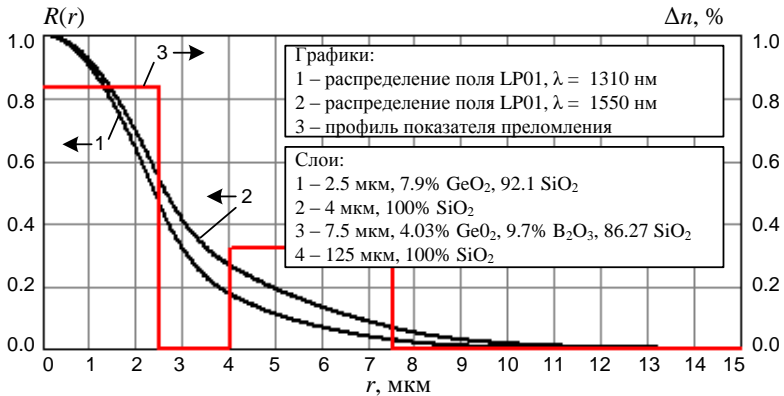


Рис. 1. $R(r)$ для основной моды ОВ DSF

Список литературы

1. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
2. Barake T.M. A Generalized Analysis of Multiple-Clad Optical Fibers with Arbitrary Step-Index Profiles and Applications. Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering, 1997.
3. Брюкнер Ф., Былина М.С., Глаголев С.Ф. Методика расчета хроматической дисперсии волокон с различными профилями показателя преломления // Мат. I Междунар. науч.-техн. и науч.-методич. конференции «АПИНО» Санкт-Петербург, 2012.

С.А. СЫЧУГИН, М.И. БАКУНОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО
ПРЕДВЕСТНИКА ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ
КОНЕЧНОГО ПОПЕРЕЧНОГО РАЗМЕРА**

Предложена простая модель для исследования влияния ширины лазерного пучка на эффект генерации квазистатического электромагнитного предвестника мощным ультракоротким лазерным импульсом в электрооптическом кристалле. Показано, что формирование предвестника устойчиво к уменьшению ширины пучка.

S.A. SYCHUGIN, M.I. BAKUNOV

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

**A MODEL FOR GENERATION OF QUASI-STATIC
PRECURSOR BY A LASER PULSE
OF A FINITE TRANSVERSE SIZE**

We propose a simple model for investigation of the effect of the laser beam width on the generation of quasi-static electromagnetic precursor by an intense ultrashort laser pulse in an electro-optic crystal. It is shown that a precursor is formed even for a narrow laser beam.

В настоящее время большой интерес вызывают экстремально сильные (с напряженностью > 1 МВ/см) терагерцовые поля для таких приложений, как «настольное» ускорение частиц, сверхбыстрое управление магнитным порядком в веществе и нелинейная терагерцовая спектроскопия. Наиболее эффективные источники терагерцового излучения основаны на явлении оптической ректификации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. При высокой интенсивности оптической накачки негативную роль начинает играть многофотонное поглощение, которое приводит не только к истощению накачки, но и к генерации свободных носителей, поглощающих терагерцовые волны. Таким образом, фотогенерация носителей рассматривается обычно как негативный эффект для терагерцовой генерации.

Недавно было, однако, показано в работе [1], что генерация свободных носителей в условиях многофотонного поглощения накачки может приводить к позитивному эффекту – генерации квазистатических

электрического и магнитного полей, распространяющихся впереди лазерного импульса. Источником квазистатического предвестника является всплеск тока рожденных на фронте фотоионизации носителей при их ускорении электрическим полем, сопровождающим нелинейную поляризацию в кристалле.

Предсказание и исследование эффекта генерации предвестников в [1] было проведено в рамках (одномерной) модели неограниченно широкого лазерного пучка. Данное приближение не позволяет исследовать влияние поперечного размера пучка на формирование предвестника. Разработка двумерного FDTD кода является сложной ресурсоемкой задачей. В связи с этим мы предлагаем здесь простую двумерную модель, в которой движение фронта рождения и ускорения носителей заменяется дискретным пространственно-временным распределением заданных токов.

Суть модели поясняет рис. 1. Вдоль оси z с шагом Δz расположены полосы ширины d , на которых последовательно, через время $\Delta t = \Delta z/V$ (V – групповая скорость лазерного импульса), включаются токи, направленные вдоль оси y . Создаваемые токами поля распространяются с фазовой скоростью низкочастотных волн в кристалле. Ток на каждой полосе выключается через время τ , равное длительности лазерного импульса.

На рис. 2 представлены моментальные снимки электрического поля на оси z для трех моментов времени. Видно, что длина предвестника растет по мере распространения импульса накачки, а амплитуда существенно не изменяется. Расчеты показывают, что рост предвестника сохраняется до расстояний z , на порядок превосходящих размер d .

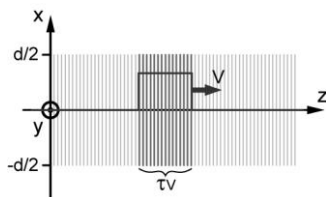


Рис. 1. Геометрия модели

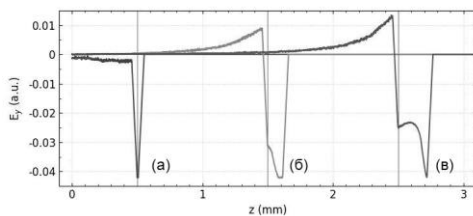


Рис. 2. Моментальные снимки электрического поля в моменты времени: 6 пс (а), 18 пс (б), 30 пс (в) при $d = 1$ мм и $\tau = 500$ фс

Список литературы

1. Bakunov M.I., Maslov A.V., Tsarev M.V. // Phys. Rev. A. 2017. V.95. P.063817.

С.С. ВЕРГЕЛЕС^{1,2}, Л.Л. ОГОРОДНИКОВ^{2,3}, В.В. ЛЕБЕДЕВ^{1,2},
И.В. КОЛОКОЛОВ^{1,2}

¹*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

³*Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.*

СТАТИСТИКА ИНТЕНСИВНОСТИ В СЛУЧАЙНОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ

Получены аналитические выражения для корреляционного момента четвертого порядка напряженности поля выходного излучения случайного волоконного лазера в первом и втором порядках по параметру нелинейности, а также посчитаны их численные значения в пределе нулевого усиления. В первом порядке по параметру нелинейности вычислены моменты высших порядков и построена функция распределения интенсивности выходного излучения случайного волоконного лазера.

S.S. VERGELES^{1,2}, L.L. OGORODNIKOV^{2,3}, V.V. LEBEDEV^{1,2},
I.V. KOLOKOLOV^{1,2}

¹*Landau Institute for Theoretical Physics of the RAS, Chernogolovka*

²*Moscow Institute of Physics and Technology State University, Dolgoprudny*

³*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region*

INTENSITY STATISTICS IN RANDOM FIBER LASER

Analytic expressions for the correlation moment of the fourth order of the intensity of the output field of a random fiber laser in the first and the second orders in terms of the nonlinearity parameter are obtained, and their numerical values are calculated in the limit of zero amplification. In the first order in the nonlinearity parameter, higher order moments are calculated and the distribution function of the intensity of the output radiation of a random fiber laser is constructed.

В последнее время большой интерес вызывают исследования в активно развивающейся области физики, связанной со случайными волоконными лазерами. Их создание и развитие имеют большое значение для различных телекоммуникационных средств связи и распределенных сенсорных систем [1-4].

В [5] построена волновая кинетическая теория для активных циклических слабонелинейных волновых систем, которая может быть использована для описания работы случайного волоконного лазера. В

частности, были установлены спектры излучения при разных мощностях порога генерации, зависимость интенсивности излучения от частоты и зависимость ширины спектра от выходной мощности, которые хорошо описывают имеющиеся экспериментальные результаты [5].

Одним из неисследованных вопросов, связанных со случайным волоконным лазером, является статистика излучения данного лазера. Такие процессы, как спонтанное излучение, а также взаимодействие различных гармоник, приводят к формированию гауссовой статистики амплитуды, то есть релеевской статистике интенсивности. Однако, экспериментально [6] в подобных системах наблюдаются сильные флуктуации выходного сигнала. Подобные флуктуации могут возникать за счёт Керровской нелинейности, поэтому функция распределения выходной интенсивности может иметь отличие от релеевского вида.

Целью данной работы является нахождение статистики излучения. Поставленная задача решается путем вычисления корреляционных моментов интенсивности высших порядков и построения по ним функции распределения.

В данной работе производится вычисление коррелятора четвертого порядка с использованием диаграммной техники Уайльда в первом и во втором порядке по теории возмущений по малому параметру нелинейности. В первом порядке по параметру нелинейности вычисляются моменты высших порядков и строится функция распределения интенсивности выходного излучения. Качественный вид полученной функции распределения хорошо согласуется с экспериментальными результатами [6].

Список литературы

1. Turitsyn S.K., et. all. Random distributed feedback lasers // Physics Reports. 2014.
2. Звелто О. Принципы лазеров, 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008.
3. Turitsyn S.K., et. all. Random distributed feedback fibre lasers // Nature Photonics. 2010.
4. Wiersma D.S. The physics and applications of random lasers // Nature Physics. 2008. №4. P.359-367.
5. Churkin D.V., et. all. Wave kinetics of random fibre lasers // Nature Communications, 2015. №2.
6. Hammani K., Finot C., Dudley J.M., Millot G. Optical rogue-wave-like extreme value fluctuations in fiber Raman amplifiers // Optics Express. 2008. V.16. P.16467.

М.С. КУЛЯ, В.А. СЕМЕНОВА, В.Г. БЕСПАЛОВ, Н.В. ПЕТРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ГАУСС-БЕССЕЛЕВА ПУЧКА

В работе проведен численный анализ импульсной широкополосной эволюции гаусс-бесселевого пучка как в пространственно-временном, так и в пространственно-спектральном представлении. Численно показано двумерное пространственно-временное поведение пучка и продемонстрированы все этапы изменения формы импульса при его распространении, в том числе формирование импульса X-образной формы. Рассчитана зависимость фазовой скорости от расстояния распространения и проведено сравнение с существующими экспериментальными результатами. Показано, что результаты расчета фазовой скорости сильно зависят от значения приращения расстояния, что свидетельствует о сверхсветовом или субсветовом поведении.

M.S. KULYA, V.A. SEMENOVA, V.G. BESPALOV, N.V. PETROV
ITMO University, Saint-Petersburg

SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF PULSED BROADBAND TERAHERTZ GAUSS-BESSEL BEAM

We numerically analyzed the evolution of pulsed broadband Gauss-Bessel beam in the spatial-temporal and spatial-spectral representation. It was shown numerically the two-dimensional spatial-temporal behavior of the beam and demonstrated all the stages of the changes of the pulse shape during its propagation, including the X-shape pulse forming. We calculated the dependence of the phase velocity on the distance distribution and a comparison with existing experimental results. It is shown that the results of the calculation of the phase velocity strongly depend on the value of the distance increment. This behavior illustrates superluminal or subluminal propagation.

В частотном терагерцовом (ТГц) диапазоне эволюция пучков Бесселя заслуживает дополнительного внимания из-за предельного случая импульсного излучения, состоящего из нескольких колебаний электрического поля. После появления когерентного метода детектирования, который позволяет прямое измерение амплитуды ТГц поля во временной области, было предпринято несколько попыток оценить экспериментально сверхсветовой эффект импульсного ТГц пучка Бесселя при распространении в среде. Например, в работе Ллойда и др. [1]

было показано сверхсветовое распространения пучка Бесселя, но только на оптической оси пучка. Изменение формы импульса по мере распространения также определено только для параксиального случая, но оно не иллюстрирует полной пространственно-временной эволюции, особенно при наличии пространственно-временной связи (spatio-temporal coupling). Кроме того, шаг по расстоянию распространения импульса в экспериментальных измерениях превышает почти на порядок величины размера самого пучка в пространстве.

Метод импульсной ТГц голографии с разрешением во времени [2-7] позволяет производить численный расчет распространения импульсного широкополосного ТГц волнового фронта и анализа его пространственной, временной и спектральной эволюции. Изменение формы импульса при его распространении иллюстрируется динамикой переноса энергии, где энергия импульса перераспределяется от переднего фронта к заднему фронту. Такое поведение отражает сильную пространственно-временную взаимосвязь параметров, когда пространственно-временное распределение волнового фронта пучка Бесселя зависит от расстояния распространения.

Работа выполнена в рамках научного проекта №3.1893.2017/4.6, выполняемого научными коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Lloyd J., Wang K., Barkan A., Mittleman D.M. Characterization of apparent superluminal effects in the focus of an axicon lens using terahertz time-domain spectroscopy // *Opt. communications*. 2003. V.219. P.289-294.
2. Petrov N.V., Kulya M.S., Tsyupkin A.N., Bepalov V.G., Gorodetsky A. Application of Terahertz Pulse Time-Domain Holography for Phase Imaging // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. V.6. No.3. P.464-472.
3. Kulya M.S., Balbekin N.S., Gredyuhina I.V., Uspenskaya M.V., Nechiporenko A.P., Petrov N. V. Computational terahertz imaging with dispersive objects // *Journal of Modern Optics*. 2017. V.64(13). P.1283-1288.
4. Balbekin N.S., Kulya M.S., Rogov P.Yu., Petrov N.V. The modeling peculiarities of diffractive propagation of the broadband terahertz two-dimensional field // *Physics Procedia*. 2015. V.73. P.49-53.
5. Balbekin N.S., Kulya M.S., Petrov N.V. Terahertz pulse time-domain holography in dispersive media // *Computer Optics*. 2017. V.41(3). P.348-355.
6. Semenova V.A., Kulya M.S., Bepalov V.G. Numerical simulation of broadband vortex terahertz beams propagation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V.735. No.1. P.012064.
7. Semenova V.A., Kulya M.S., Bepalov V.G. Spatial-temporal dynamics of broadband terahertz Bessel beam propagation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V.735. No.1. P.012063.

М.С. АСТАПОВИЧ, А.Н. КОЛЯДИН, А.В. ГЛАДЫШЕВ,
А.Ф. КОСОЛАПОВ, А.Д. ПРЯМИКОВ, М.М. ХУДЯКОВ,
М.Е. ЛИХАЧЕВ, И.А. БУФЕТОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

**ПОЛУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ВКР-ГЕНЕРАЦИИ
НА 4,4 мкм И ИЗМЕРЕНИЕ С ЕЁ ПОМОЩЬЮ
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОГО
РЕВОЛЬВЕРНОГО СВЕТОВОДА**

Приведены результаты по получению эффективной ВКР-генерации на длине волны 4,4 мкм в полном револьверном световоде, заполненном молекулярным водородом ($^1\text{H}_2$). С помощью полученного источника лазерного излучения измерены оптические потери и получено распределение интенсивности поля в полном револьверном световоде на длине волны 4,4 мкм.

M.S. ASTAPOVICH, A.N. KOLYADIN, A.V. GLADYSHEV,
A.F. KOSOLAPOV, A.D. PRYAMIKOV, M.M. KHUDYAKOV,
M.E. LIKHACHEV, I.A. BUFETOV

Fiber Optic Research Center of the RAS, Moscow

**EFFECTIVE RAMAN GENERATION AT 4.4 μM
AND MEASUREMENT WITH ITS HELP THE OPTICAL
CHARACTERISTICS OF THE HOLLOW-CORE
REVOLVER FIBER**

Results of obtaining effective stimulated Raman scattering at a wavelength of 4.4 μm in a hollow-core revolver fiber filled with molecular hydrogen ($^1\text{H}_2$) are presented. Using the obtained laser radiation source optical losses were measured and a field intensity distribution was obtained for a hollow-core revolver fiber at a wavelength of 4.4 μm .

На сегодняшний день в среднем ИК-диапазоне существует недостаток лазерных источников и, в особенности, волоконных лазерных источников. При этом в них есть необходимость в диапазоне 3-5 мкм для ряда применений в биомедицине, для детектирования и анализа газов, а также для применения в оборонной технике («ослепление» тепловых датчиков). Полые волоконные световоды способны обеспечивать распространение излучения в диапазоне 3-5 мкм, но характеристика их свойств сильно

затруднена вследствие отсутствия готовых решений для измерения оптических характеристик световодов в данном диапазоне. Всё это делает создание волоконных источников лазерного излучения среднего ИК-диапазона и характеризацию полых световодов в этом диапазоне важной перспективной задачей.

В полом револьверном световоде (РС), заполненном молекулярным водородом, получена ВКР-генерация на длине волны 4,4 мкм со средней мощностью ~ 250 мВт и квантовой эффективностью 36 %. РС, использованный в данной работе (рис. 1а), аналогичен по своим характеристикам световоду, применявшемуся в работе [1]. Диаметр поля моды составлял 56 мкм.

Получено поперечное распределение интенсивности излучения на 4.4 мкм (рис. 1б, излучение основной моды, модулированное явлениями интерференции на входном окне ИК камеры). При помощи такого одномодового источника измерена зависимость пропускания РС от его длины (рис. 2). Ее ясно выраженный экспоненциальный характер позволил определить оптические потери РС с точностью не хуже 2 %.

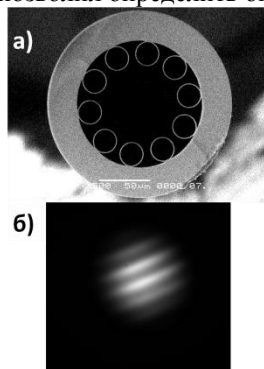


Рис. 1. Поперечное сечение измеряемого световода (диаметр полой сердцевины 75 мкм) (а); излучение 4.4 мкм ВКР-лазера (б)

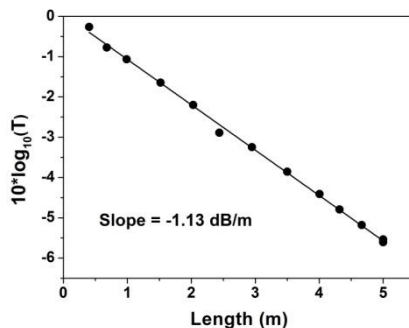


Рис. 2. Пропускание световода на длине волны 4,4 мкм в зависимости от его длины

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект №16-19- 10513).

Список литературы

1. Gladyshev A.V., et al. 4.4-um Raman laser based on hollow-core silica fibre // Quantum Electron. 2017. V.47. P.491-494.

О.А. БУРДУКОВА^{1,2}, В.А. ПЕТУХОВ^{1,2}, М.А. СЕМЕНОВ²

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

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

КВАЗИПРОДОЛЬНАЯ НАКАЧКА ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЯХ ЗЕЛЕНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ДИОДАМИ

В данной работе представлены результаты экспериментов по эффективной квазипродольной накачке лазера на красителях зелеными ($\lambda = 520$ нм) полупроводниковыми лазерами. В трехзеркальном резонаторе с компенсацией астигматизма был получен дифф. КПД свыше 41 % на красителе пиррометен 567.

O.A. BURDUKOVA^{1,2}, V.A. PETUKHOV^{1,2}, M.A. SEMENOV²

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

QUASI-LONGITUDINAL PUMPING OF THE DYE LASER BY GREEN LASER DIODES

We present the results of experiments on the effective quasi-longitudinal pumping of the dye laser by green ($\lambda = 520$ nm) diode lasers. The best obtained slope efficiency was approximately 41 % for pyromethene 567 in the astigmatically compensated three-mirror cavity design.

Появление мощных полупроводниковых лазеров видимого диапазона дает возможность перейти к компактной и недорогой диодной накачке в лазерах на красителях (ЛК). Основной проблемой при диодной накачке ЛК является нехватка плотности мощности для возбуждения молекул красителей. До недавнего времени даже в лучших работах КПД не превышал 2 %. В [1] был получен дифф. КПД 11 % на DCM, но с резонатором, непригодным для перестройки длины волны генерации. Нам уже удалось не только получить рекордное значение дифф. КПД (18 %) для ЛК с диодной накачкой, но и впервые продемонстрировать перестройку излучения в широком диапазоне длин волн: от 500 нм до 700 нм [2, 3]. Несмотря на значительные успехи, полученные нами при использовании поперечной схемы накачки, продольные схемы представляют особый интерес.

Целью работы являлось проведение испытаний по квазипродольной накачке ряда красителей с целью получения генерации при импульсном

возбуждении зелеными диодами, что позволит сделать большой шаг на пути к синхронизации мод в ЛК с полупроводниковой накачкой. Наиболее мощными полупроводниковыми лазерами видимого диапазона являются голубые диоды (445 нм), но т.к. родамин 6Ж и пиррометены почти не поглощают на этой длине волны, в качестве накачки были выбраны два многомодовых 1 Вт диода NDG7475 (520 нм) фирмы Nichia.

Накачка осуществлялась импульсами длительностью 200 нс и частоте следования 2 Гц под углом падения 13° к оси резонатора (рис. 1). В области перетяжки под углом Брюстера расположена кювета с раствором красителя в этаноле. Излучение каждого диода коллимируется асферической линзой типа G2 ($f = 4.0$ мм), затем у одного из диодов с помощью $\lambda/2$ пластины поляризация меняется на ортогональную, после чего пучки сводятся вместе поляризационным светоделителем. Так как мощные многомодовые лазерные диоды обладают сильной анизотропией излучения, пучок расширялся вдоль «медленной» оси цилиндрическим телескопом и затем фокусировался сферической линзой ($f = 50$ мм) на кювету с красителем. В результате нам удалось сфокусировать излучение диодов в пятно 20×40 мкм.

Получена генерация на ряде красителей в широкополосном резонаторе при импульсной накачке диодами. При использовании зеркала с пропусканием 12 % дифф. КПД составил 41.1 % для пиррометена 567, а порог генерации 320 нДж. Выходная энергия генерации составила 161 нДж при поглощенной энергии накачки в 716 нДж. В результате была впервые получена генерация в ЛК при накачке зелеными диодами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН, программа «Фотоника» (1.25П).

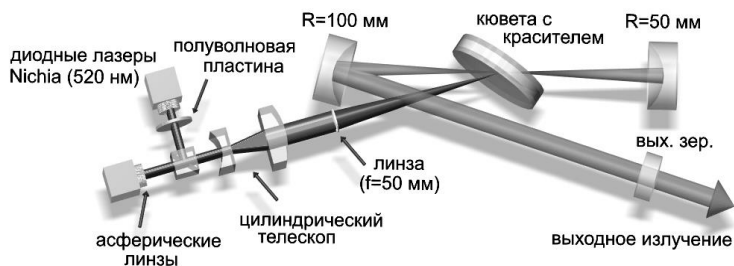


Рис. 1. Схема лазера на красителе с диодной накачкой зелеными диодами

Список литературы

1. Zhao Z., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V.106. P.051112.
2. Burdukova O.A., et. al. // Laser Phys. Lett. 2016. V.13. P.105004.
3. Burdukova O.A., et. al. // Appl. Phys. B. 2017. V.123. P.84.

П.О. ЯКУШЕНКОВ^{1,2,3}¹Национальный исследовательский университет МИЭТ, Зеленоград²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный³АО «Ангстрем», Зеленоград**МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ЛАЗЕРА ИЗМЕНЕНИЕМ НАМАГНИЧЕННОСТИ СРЕДЫ**

Эффект оптического переключения намагниченности быстрый, времена переключения ~ пс. В докладе рассмотрен вариант управления света светом на примере полупроводникового лазера на ферромагнетике.

P.O. YAKUSHENKOV^{1,2,3}¹National Research University of Electronic Technology «MIET», Zelenograd²Moscow Institute of Physics and Technology State University), Dolgoprudny³JCK «Angstrom», Zelenograd**MODULATION OF SEMICONDUCTOR LASER CHANGING
IT'S MAGNETISATION**

The optical switching of magnetization is very fast (~ps). In example of ferromagnetic semiconductor laser is shown a variant of controlling the light using light.

Эффект оптического переключения намагниченности лазерными импульсами аналогичен эффекту переключения намагниченности в спин-вентильных структурах током, который описывается уравнением Ландау-Лившица-Гильберта с префактором спиновой эффективности передачи вращательного момента Слончевского-Берже [3]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}] + \frac{\alpha}{M}[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}] + \mathcal{I}G[\mathbf{M} \times [\mathbf{e}_z \times \mathbf{M}]]$$

где $I = \frac{\hbar}{2et_F M^2} J$, $\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{\delta E}{\delta \mathbf{M}} = \frac{2K}{M^2} \mathbf{e}_z (\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{M})$. При поляризации вещества

диэлектрическая проницаемость описывается как: $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + i[\mathbf{g} \times \mathbf{E}]$, где $\mathbf{g} = \alpha \mathbf{H}$, \mathbf{H} - магнитная компонента света добавляет в тензор ε_{ij} недиагональные компоненты [4]

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & i \cdot g & 0 \\ -i \cdot g & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{pmatrix}.$$

В магнитных средах магнитное поле среды (намагниченность) будет также добавлять недиагональные компоненты в ε_{ij} , где $\mathbf{g} = \alpha \mathbf{M}$, а \mathbf{M} – намагниченность. Если n – показатель преломления, то $\Delta \varepsilon_{ij} = m_{ijk} \mathbf{M}_k = \Delta(n_{ij})^2$, $i \neq j$. Таким образом, можно моделировать излучение полупроводникового лазера изменением намагниченности среды светом. Реализовать подобный лазер можно на такой ферромагнитной гетероструктуре как ViFeO_3 [5], легировав ViFeO_3 какими-нибудь соединениями с Hf или W для создания полупроводника p -типа и n -типа соответственно (предположение, возможны лучшие варианты) и осуществив лазерную генерацию на таком p - n переходе, можно управлять ею, меняя намагниченность структуры светом.

Список литературы

1. Kimel A, Kirilyuk A, Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferromagnetic garnet films // Nature. 2005. №45. P.047402.
2. Kimel A, Kirilyuk A, Rasing T. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferromagnetic alloys // Iopscience. 2013. №76. P.026501.
3. Попков А.Ф., Журавлев М.Н. Физические основы магнетизма и спинового транспорта в устройствах магнитной электроники. М.: ИПК МИЭТ, 2014.
4. Вдовичев С.Н. Магнитооптические эффекты. Методическое пособие. Нижегородский государственный университет им. Лобачевского, 2010.
5. Давыдова М. Влияние электрического поля на спектр магнонов в перовскитоподобном мультиферроике феррите висмута // Доклад на семинаре лаборатории спинтроники МФТИ. 2016.
6. Якушенков П.О., Балаклеяский Н.С. Фотонные интегральные схемы // Сб. докладов 6-ой Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2017, С.146-148.
7. Тамир Т. Волноводная оптоэлектроника. М.: Мир, 1991.
8. Хансперджер Р. Интегральная оптика. М.: Мир, 1985.

И.С. КУДЕЛИН, Д.А. ДВОРЕЦКИЙ, С.Г. САЗОНКИН,
И.О. ОРЕХОВ, А.Б. ПНЕВ, В.Е. КАРАСИК, Л.К. ДЕНИСОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ГРУПП СВЯЗАННЫХ
СОЛИТОНОВ В ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОНОМ КОЛЬЦЕВОМ
ЭРБИЕВОМ ЛАЗЕРЕ С ВЫСОКОНЕЛИНЕЙНОМ
РЕЗОНАТОРОМ**

В работе получена устойчивая генерация группы из $N \sim 21$ связанных солитонов с длительностью по полувысоте ~ 240 фс на частоте повторения $\sim 11,3$ МГц в полностью волоконном эрбиевом лазере с высоконелинейным резонатором.

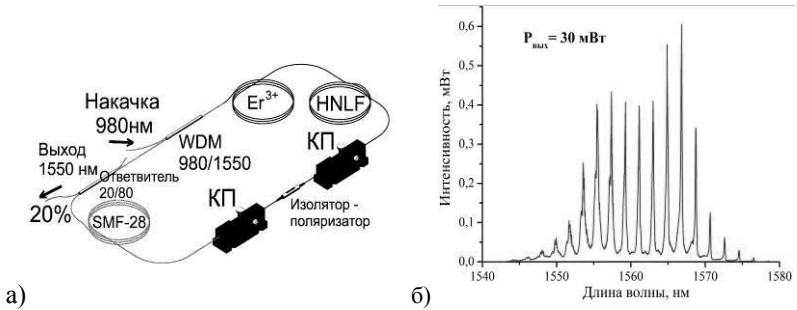
I.S. KUDELIN, D.A. DVORETSKIY, S.G. SAZONKIN,
I.O. OREKHOV, A.B. PNEV, V.E. KARASIK, L.K. DENISOV
Bauman Moscow State Technical University

**GENERATION PARTICULARITIES OF MULTIBOUND
SOLITONS IN AN ALL-FIBER ERBIUM-DOPED RING LASER
WITH A HIGHLY NONLINEAR RESONATOR**

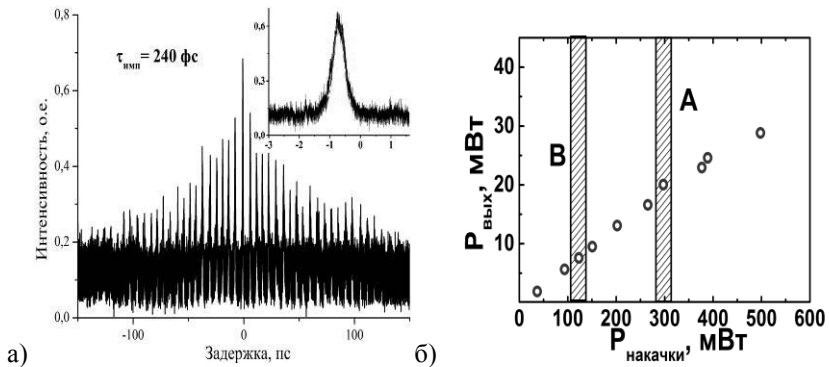
In this work was obtained a generation of ~ 21 solitons in bound state with duration of ~ 240 fs at repetition frequency ~ 11.3 MHz in erbium all-fiber laser with highly nonlinear cavity.

В последнее время изучение нелинейной динамики синхронизации мод в лазерном резонаторе направлено на получение новых режимов генерации ультракоротких импульсов. В данной работе получена генерация группы связанных солитонов на частоте повторения $\sim 11,3$ МГц в полностью волоконном лазере с кольцевым резонатором, образованным активным эрбиевым волокном (Er^{3+}), высоконелинейным германосиликатным волокном и волокном SMF-28(Corning Corp.), схема которого аналогична [1]. Отметим, что суммарная внутррезонаторная дисперсия групповых скоростей сведена до значения $\sim -0,0053$ пс² на длине волны 1550 нм. Схема кольцевого резонатора полностью волоконного лазера представлена на рис. 1а. На рис. 1б показан спектр выходного излучения группы связанных солитонов при выходной мощности ~ 30 мВт. Отметим, что наличие значительного гистерезиса порога генерации связанных импульсов (см. рис. 2б) и высокий контраст

интерференционных полос в спектре генерации (см. рис. 1б) говорит об устойчивости полученного режима СМ [2, 3].



а) б)
Рис. 1. Схема кольцевого волоконного эрбиевого лазера с высокочелюнейным резонатором (а); спектр выходного излучения (б)



а) б)
Рис. 2. Автокорреляция группы связанных солитонов с приближением гаусса к центральному пику (а); зависимость средней выходной оптической мощности от мощности накачки: А – порог генерации, В – разрушение генерации (б)

Автокорреляция по интенсивности, представленная на рис. 2а, свидетельствует о генерации группы из $N \sim 21$ связанных солитонов, разделенных по времени на ~ 5 пс и длительностью одного импульса по полувысоте ~ 240 фс.

Список литературы

1. Dvoretzkiy D.A., et al. // Opt. Express. 2015. V.23. P.33295.
2. Grelu Ph., et al. // Opt. Express. 2003. V.27. No.11.
3. Tang D.Y., et al. // Physical Review. 2005. A72.P.043816.

В.П. ЯКУНИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ АКТИВНЫХ СРЕД ДИОДНЫХ
И ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ
МАСШТАБИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ
МУЛЬТИКИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ
НЕКОГЕРЕНТНЫХ МЕТОДОВ СУММИРОВАНИЯ ПУЧКОВ**

Впервые предложена методика характеристики активных сред волоконных и диодных лазерных систем для задач масштабирования мощности излучения до мультикиловаттного уровня с квазидифракционной расходимостью с использованием некогерентных способов суммирования пучков одномодовых волоконных и диодных лазеров для технологических (диодные лазерные системы прямого действия) и специальных применений (мощные волоконные лазерные системы). Методика основана на применении концепции «виртуальной» линейки одномодовых излучателей для реализации спектрального суммирования пучков в специальной схеме устойчивого резонатора с дифракционной решеткой.

V.P. YAKUNIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura*

**CHARACTERIZATION OF THE ACTIVE MEDIA OF DIODE
AND FIBER LASER SYSTEMS FOR POWER SCALING
TO MULTI-KILOWATT RADIATION LEVEL BASED
ON INCOHERENT METHODS OF BEAM COMBINING**

A technique for characterizing the active media of fiber and diode laser systems for the problems of scaling the radiation power to a multi-kilowatt level with quasi-diffraction divergence is proposed for the first time, using incoherent methods for summing single-mode fiber and diode laser beams for technological (diode laser systems of direct action) and special applications (high-power fiber laser systems). The technique is based on the application of the concept of a "virtual" array of single-mode radiators for realizing the spectral combining of beams in a special scheme of a stable resonator with a diffraction grating inside it.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик излучения одномодового лазерного диода (ОЛД) с

просветленной выходной гранью помещаемого в устойчивый резонатор с дифракционной решеткой [1, 2]. В этом случае лазерный диод представляет собой один из элементов резонатора – активную среду.

На рис. 1 показан спектр генерации одиночного ОЛД с просветленной гранью и микролинзой при его заданном перемещении в фокальной плоскости согласующей линзы перпендикулярно оптической оси. Общая ширина спектра генерации достигает 45 нм. Расстояние между отдельными линиями генерации 3,5 – 3,6 нм при ширине линий генерации $< 0,3$ нм, мощность генерации достигает 250 мВт.

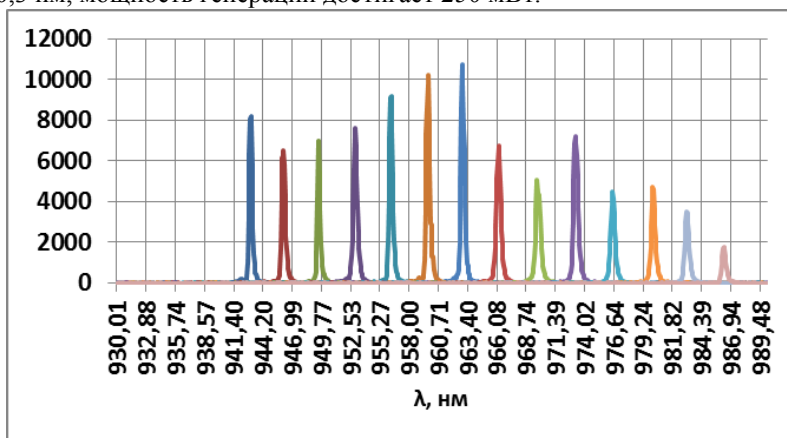


Рис. 1. Спектр генерации одиночного ОЛД с просветленной гранью и микролинзой

Что касается волоконных лазеров, то характеристика их активных сред для целей масштабирования мощности должна проходить по той же схеме, причем отдельные одномодовые волоконные лазеры с просветленной выходной гранью должны размещаться в виде линейки излучателей в фокальной плоскости согласующей линзы. При суммировании их пучков следует иметь в виду дополнительные требования на элементы проходной оптики резонатора, которые по оценкам должны надежно работать при плотностях мощности до 3 кВт/см^2 при общей мощности суммарного пучка до 5 кВт.

Обсуждаются несколько внрезонаторных схем суммирования пучков мощных волоконных лазеров для достижения еще большей мощности.

Список литературы

1. Huang R.K., Chann B., et.al. // Technol. Lett. 2007. V.19. №4. P.209-211.
2. Sanchez-Rubio A., Fan T.Y., et.al. // Linkoln Laboratory journal. 2014. V.20. №2.

Г.В. ШИЛОВА¹, А.А. СИРОТКИН^{1,2}, П.Г. ЗВЕРЕВ¹

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

Nd:YAP ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ВКР ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ И ГЕНЕРАЦИЕЙ СУММАРНОЙ ЧАСТОТЫ

Создан твердотельный лазер с внутриврезонаторным ВКР преобразованием и генерацией суммарной частоты на длине волны 572 нм. Пиковая мощность составила 1,5 кВт, длительность импульса – 6,3 нс и эффективность преобразования – 1,4 %.

G.V. SHILOVA¹, A.A. SIROTKIN^{1,2}, P.G. ZVEREV¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

Nd:YAP LASER WITH INTRACAVITY SRS-CONVERSION AND SUM-FREQUENCY GENERATION

All-solid-state laser with intracavity SRS-conversion and sum-frequency generation with 572 nm wavelength generation was made. Output peak power – 1,5 kW, pulse width – 6,3 ns and conversion efficiency is 1,4 %.

В лазерной хирургии распространен метод селективной лазерной коагуляции, т.е. нагревание и разрушение определенного компонента кожи без повреждения остальной ткани. За поглощение в крови отвечают гемоглобин, оксигемоглобин. Также в желто-зеленой области гемоглобин обладает одной широкой полосой поглощения, а оксигемоглобин обладает двумя полосами поглощения с максимумами на длинах волн 541 и 577 нм [1]. Сегодня в медицине используют лазеры, работающие в этом диапазоне длин волн. Например, лазеры на красителях и на парах меди [2, 3]. Они подходят по длине волны, но обладают большими массогабаритными параметрами и высоким энергопотреблением. Твердотельные лазеры с диодной накачкой (например, Nd:YAG с удвоением частоты в кристалле KTP) лишены этих недостатков, но излучение 532 нм не является оптимальным. [4]. Поэтому важной задачей является создание компактного источника лазерного излучения с длиной волны, близкой ко второму пику поглощения крови. Реализованы лазерные системы с суммарной частотой излучения с длинами волн 1064 и 1342 нм [5] или ВКР

самопреобразование с последующей генерацией второй гармоники [6]. В данной работе представлен лазер, работающий на длине волны 572 нм, которая находится рядом с максимум поглощения оксигемоглобина.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Кристалл аллюмината иттрия $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$ служил активным элементом, с генерацией на длине волны 1080 нм. В кристалле нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ было реализовано внутррезонаторное ВКР преобразование основного излучения, и затем в кристалле LBO происходило смешение этих двух частот, в результате чего на выходе получено излучение с длиной волны 572 нм. Для модуляции добротности использовался акустооптический затвор.

На рис. 2 показан график зависимости средней выходной мощности с длиной волны излучения 572 нм от мощности накачки при разных частотах повторения импульсов. Максимальная средняя мощность составила 100 мВт при частоте повторения импульсов 10кГц и мощности накачки 7 Вт. Длительность импульса – 6,3нс, пиковая мощность – 1,5 кВт, а эффективность преобразования – 1,4 %.

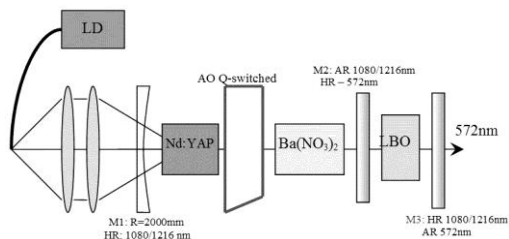


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

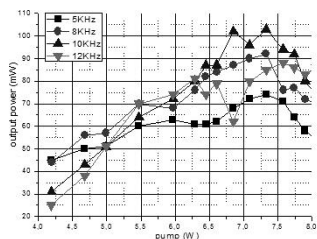


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности от мощности накачки при разных частотах повторения импульсов

Список литературы

1. Alster T.S., Lupton J.R. // Am J Clin Dermatol. 2001. V.2(5).P.291-303.
2. Шептий О.В., Круглова Л.С. и др. // Рос. ж-л кожн. и верен. болезней. 2012. №6. С.39-43.
3. Kenneth A. Arndt M.D. // J Am Acad Dermatol. 1984. V.11 (1). P.90-97.
4. Ключарева С.В., Пономарев И.В. // Вест. Эстет. Медицины. 2004. №4 (1). С.22-28.
5. Mimoun E., De Sarlo L., et al. // Opt. Express. 2008. V.16(23). P.18684-18691.
6. Omatsu T., Lee A. et. al. // 2007 OSA.

А.В. ШУЛЬГА, А.В. ХОМЧЕНКО, И.В. ШИЛОВА
Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД ДИСКРИМИНАЦИИ МОД ЛАЗЕРА

Предложен и экспериментально реализован метод внутриврезонаторной дискриминации мод лазера. Метод основан на частотно-угловой селективности поглощения внутриврезонаторного излучения призмным устройством связи, выполненного в виде параллелепипеда. Показано, что предложенный метод позволяет реализовать селективную дискриминацию мод в лазерах с малым коэффициентом усиления без внесения в резонатор значительных потерь.

A. V. SHULGA, A. V. KHOMCHENKO, I. V. SHILOVA
Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

WAVEGUIDE TECHNIQUE OF LASER MODE DISCRIMINATION

A new waveguide technique for intracavity laser mode discrimination is proposed and experimentally investigated. The technique is based on the frequency-angular selectivity of intracavity radiation absorption by parallelepiped prism coupler. It was shown that the proposed technique allows one to discriminate selectively modes of low-gain lasers without bringing significant losses in the cavity.

Частотно-угловая селективность оптического поглощения призмного устройства связи [1] позволяет использовать его в качестве источника вносимых контролируемых внутриврезонаторных потерь. В настоящем сообщении представлен метод и описана установка для осуществления внутриврезонаторной дискриминации поперечных мод лазера (рис. 1), где в качестве источника селективных потерь применялось «брюстеровское» призмное устройство связи [2], состоящее из оптически прозрачной призмы, выполненной в виде параллелепипеда, к одной из граней которой прижат планарный диэлектрический волновод с малыми оптическими потерями. Призма устанавливалась внутри резонатора таким образом, чтобы внутриврезонаторное излучение претерпевало двукратное внутреннее отражение с возбуждением планарного волновода. Угловым перемещением призмного устройства связи осуществлялась его селективность к угловому распределению внутриврезонаторного излучения, что позволяло избирательно вносить внутриврезонаторные потери для мод заданных порядков.

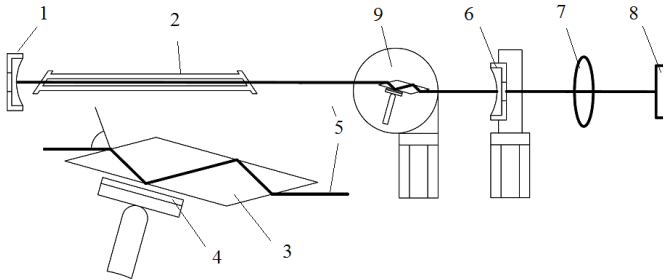


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – глухое зеркало, 2 – активный элемент, 3 – призма связи, 4 – волновод, 5 – внутрирезонаторное излучение, 6 – выходное зеркало, 7 – фурье-линза, 8 – фотодиод

На рис. 2 показано зарегистрированное угловое распределение интенсивности 1-моды резонатора гелий-неонового лазера, образованного сферическими зеркалами (непрерывная кривая), а также теоретическое распределение интенсивности (пунктирная кривая) излучения резонатора лазера с соответствующими физическими параметрами.

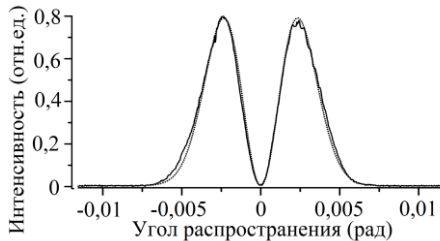


Рис. 2. Расчётное и экспериментальное распределения интенсивности первой моды излучения гелий-неонового лазера

Результаты численных расчётов удовлетворительно коррелировали с данными измерений, которые показали принципиальную возможность предложенного метода внутрирезонаторной дискриминации поперечных мод лазера.

Список литературы

1. Khomchenko A.V., Waveguide spectroscopy of thin films. NY: Academic Press, 2005.
2. Шульга А.В., Шилова И.В., Хомченко А.В.// Материалы XXIII международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2017. С.309-312.

Ф.А. ЕГОРОВ, В.Т. ПОТАПОВ

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

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА В АНИЗОТРОПНЫХ МИКРО-(НАНО) СВЕТОВОДАХ С КРУТИЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Рассмотрена возможность лазерного возбуждения крутильных колебаний анизотропных микро-(нано) световодов за счет эффекта Садовского. Получены оценки эффективности поляризационной модуляции излучения в предложенных составных анизотропных микро-(нано) световодах в условиях резонансных крутильных колебаний.

F.A. EGOROV, V.T. POTAPOV

Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

POLARIZATION MODULATION OF LIGHT IN ANIZOTROPIC OPTICAL MICRO/NANO FIBERS WITH TORSIONAL OSCILLATIONS

The possibility of laser excitation of torsional oscillations in optical micro/nano fibers due to the Sadovsky effect is considered. Estimates for the efficiency of polarization modulation in composite anizotroic optical micro/nano fibers are obtained under conditions of resonant torsional oscillations.

Деформация кручения в волоконных световодах приводит к их поляризационной анизотропии, что находит широкое применение для управления состоянием поляризации оптического излучения [1]. Значительная поляризационная модуляция излучения возможна, в частности, в микро-(нано)световодах (МНС) с крутильными колебаниями, которые могут возбуждаться, например, под действием переменного электрического поля на «случайные» электрические заряды, находящиеся на поверхности МНС [2]. В связи с тем, что свойства МНС (как и многих микро-нанообъектов) существенно определяются оптомеханическим взаимодействием [3], большой интерес представляет рассмотрение возможности лазерного возбуждения мод крутильных колебаний МНС, открывающего перспективы создания полностью волоконных поляризационных устройств, управляемых светом.

В настоящей работе показано, что в поляризационно-анизотропных МНС (ПАМНС) лазерное возбуждение крутильных колебаний может осуществляться благодаря эффекту Садовского [4], который в силу фундаментального, универсального характера обеспечивает полную детерминированность процесса возбуждения крутильных колебаний и независимость эффективности данного механизма возбуждения от особенностей структуры двулучепреломляющей среды, методов изготовления и материала МНС, что существенно расширяет условия их функционирования и области применений. Основное внимание уделено исследованию составных ПАМНС, которые могут быть реализованы в рамках «обычных» технологий волоконной оптики, в частности, путем вытяжки «перетяжек» и их сварного соединения (рис. 1), формирующих последовательное соединение сегментов изотропных $((0, z_3), (z_4, z_7))$ и анизотропных (z_3, z_4) волоконных световодов с микронными размерами.

Оценки показывают, что амплитуда колебаний плоскости поляризации пробного излучения (λ_3) в условиях лазерного возбуждения резонансных крутильных колебаний четверть волнового анизотропного сегмента при мощности излучения (λ) $p_0 = 1\text{mW}$ и механической добротности $Q = 10^4$ достигает $0,14\text{ rad}$.

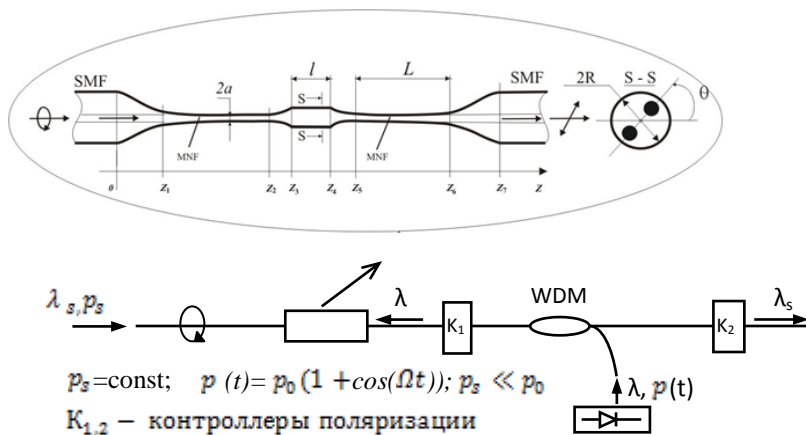


Рис. 1. Схема волоконного поляризационного модулятора на основе ПАМНС

Список литературы

1. Budinski V., Donlagic D. // Sensors. 2017. V.17. 443. P.1-29.
2. Wuttke C., Cole G.D., Rauschenbeutel A. // Phys. Rev. 2013. A88. P.061801 R.
3. Butsch A., Kang M.S., Euser T.G., et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V.109. P.83904.
4. Валитов Р.А., Хижняк Н.А., Жилков В.С. и др. Пондеромоторное действие электромагнитного поля (теория и приложения). М.: «Сов. Радио», 1975.

А.Л. ДМИТРИЕВ, Н.Н. ЧЕСНОКОВ¹

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

¹*ООО «Сартогосм», Санкт-Петербург*

УМЕНЬШЕНИЕ ВЕСА ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В НЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Экспериментально показано уменьшение веса волоконного световода (волоконного жгута) при распространении в нем излучения полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм. При мощности вводимого в световод излучения 70 мВт и экспозиции 20 с уменьшение массы световода равно 6 мкг с погрешностью измерений 1 мкг. Отмечена инерционность наблюдаемого эффекта, свидетельствующая о его, по-видимому, тепловой природе.

A.L. DMITRIEV, N.N. CHESNOKOV¹

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg

¹*Sartogsm Ltd, Saint-Petersburg*

REDUCTION OF THE WEIGHT OF OPTICAL FIBER DURING DISTRIBUTION OF LASER RADIATION

The reduction of the weight of an optical fiber (fiber bundle) during distribution of semiconductor laser radiation with a wavelength of 650 nm is shown experimentally. With the power of radiation input into light guide of 70 mW and exposure of 20 sec., reduction of the weight of the fiber is equal to 6 μg with a measuring accuracy error of 1 μg . Inertia of the observed effect, indicating its possible thermal nature, has been detected.

Высокие плотности мощности лазерного излучения и возможность его локализации посредством волоконных световодов создают предпосылки проведения экспериментов по исследованию гравитационных свойств света с использованием современных высокоточных весов. Нами выполнено взвешивание герметичного контейнера с находящейся в нем катушке волоконного световода (волоконным жгутом) длиной 4.6 м при вводе в световод излучения полупроводникового лазера. Мощность лазера 70 мВт, длина волны излучения 650 нм. Входной и выходной торцы световода, в виде трех соединенных отрезков волоконного жгута, заключены в цилиндрические оправы диаметром 2.5 мм и закреплены на стенках дюралюминиевого контейнера диаметром 33 мм и длиной 49 мм. Световой диаметр торца волоконного жгута производства Лыткаринского завода оптического стекла - 1.5 мм. Излучение лазера вводится в световод

через прозрачную стенку витрины весов (компаратора) марки SARTORIUS CC50, находящихся в гермозоне при нормальных температуре и атмосферном давлении.

Лазер периодически включался на время 20 с, после чего следовала пауза длительностью от 40 до 50 с. Отсчеты показаний весов производились с периодом 5 с. Дискретность отсчетов массы контейнера величиной около 37.4 г равна 1 мкг. Стабильный температурный дрейф показаний весов + 0.2 мкг/с.

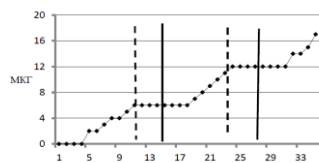


Рис. 1. Временная зависимость изменения массы контейнера

зависимости, при которых происходит компенсация положительного дрейфа показаний компаратора. Обращает на себя внимание инерционность наблюдаемого эффекта: уменьшение веса контейнера происходит не только во время экспозиции, но и в течение примерно 20 с после выключения лазера. Как видно из графика, уменьшение веса контейнера вследствие действия лазера составляет 6 мкг с погрешностью измерений 1 мкг.

Конструкция контейнера и теплозащита сердцевины волоконного жгута практически исключали заметное нагревание корпуса контейнера в первые секунды после включения лазера. Поэтому причина изменения веса контейнера, по-видимому, не связана с влиянием на него сил плавучести, а вызвана нагревом световода вследствие поглощения в нем излучения лазера. Такое уменьшение веса световода согласуется с ранее установленной отрицательной температурной зависимостью веса тел [1, 2]. Особенности изменения веса волоконного световода при распространении в нем лазерного излучения представляют большой интерес для физической и волоконной оптики, а также для метрологии массы, и должны быть предметом специальных исследований.

Список литературы

1. Дмитриев А.Л., Никущенко Е.М., Снегов В.С. Влияние температуры тела на его вес // Измерительная техника. 2003. №2. P.8-11.
2. Dmitriev A.L., Bulgakova S.A. Negative Temperature Dependence of Gravity – A Reality. World Academy of Science // Engineering and Technology. 2013. Is.9, P.1560-1565.

А.Б. ФЕДОРЦОВ, В.В. МАНУХОВ¹, А.С. ИВАНОВ

Санкт-Петербургский горный университет

¹*Санкт-Петербургский государственный университет*

ДВУХЛАЗЕРНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Описан оптический неразрушающий метод контроля длины диффузии носителей заряда в полупроводниках и диэлектриках. Исследованы образцы из кремния (в том числе покрытые слоем изолятора). Метод применим как в промышленности, так и в научных исследованиях.

A.B. FEDORTSOV, V.V. MANUKHOV¹, A.S. IVANOV

Saint-Petersburg Mining University

¹*Saint-Petersburg State University*

TWO-LASER CONTACTLESS METHOD OF THE DETERMINING THE ELECTRONIC PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Described optical non-destructive control of the diffusion of charge carriers in semiconductors and dielectrics. Samples of silicon (including covered with a layer of insulator) were examined. The method is applicable both in industry and in scientific research.

Длина диффузии носителей заряда является важной электрофизической характеристикой материала. В настоящее время предложено много различных методов прямого измерения диффузионной длины. Наиболее известными из них являются метод подвижного зонда и его разновидности, а также метод движущегося электронного зонда [1-5]. Реализация каждого из них требуют создания электрического контакта с исследуемым образцом. Авторами предложен и запатентован бесконтактный неразрушающий метод контроля длины диффузии [6, 7], основанный на оптической генерации неравновесных носителей заряда в материале с помощью коротковолнового инжектирующего лазера и оптическом считывании информации с помощью другого – длинноволнового зондирующего лазера. При увеличении расстояния r между точками генерации и измерения наблюдается уменьшение величины измерительного сигнала вследствие уменьшения концентрации

носителей. Это уменьшение зависит от диффузионной длины, которую можно определить сравнением экспериментальной и расчетной зависимостей величины измеряемого сигнала от расстояния между областью генерации и точкой измерения сигнала (7).

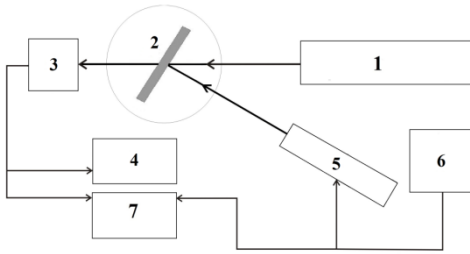


Рис. 1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источником зондирующего излучения (1) служил лазер ЛГ-ГНИК-1 ($\lambda = 3,39$ мкм, $P = 6$ мВт). Генерация носителей заряда осуществлялась лазерным модулем (5) КЛМ-Н980-200-5 ($\lambda = 0,980$ мкм, $P = 200$ мВт) с коллимированным пучком

излучения малой расходимости и дополнительным входом внешней ТТЛ-модуляции. Частота модуляции лазера-инжектора задавалась генератором (6) VC2002 и составляла 1400 Гц. Рассовмещение областей генерации и зондирования на заданное расстояние r осуществлялось при помощи специальной микрометрической подвижки (2), на которую устанавливался исследуемый образец. Прошедший через него сигнал регистрировался фотоэлектрическим приемником (3) ФЕ-724-1 и измерялся милливольтметром (4) В6-9. Для визуального контроля сигналов, полученных от генератора (6) и от фотоприемника (4), использовался двухканальный осциллограф (7) OS-5020G. Контрольные измерения проводились на образцах из монокристаллического кремния с высоким удельным сопротивлением (150 и 160 Ом·м) с чистой поверхностью и покрытые слоем коллодия. Проведенные измерения показали, что предлагаемый метод является достаточно простым в реализации и дает надежные устойчивые результаты.

Список литературы

1. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985.
2. Мосс Т., Барелл Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир, 1976.
3. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987.
4. Ковтонок Н.Ф., Концевой Ю.А. Измерение параметров полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1970.
5. Кравченко А.Ф., Конаныхин А.Б., Морозов Б.В. // ФТП. 1980. Т.2. №14. С.311.
6. Manukhov V.V., Fedortsov A.B., Ivanov A.S. // Semiconductor. 2015. V.49 (9). P.1119.
7. Манухов В.В., Федорцов А.Б., Иванов А.С. Патент РФ № 2578731.

Н.А. УС, С.П. ЗАДОРЖНИЙ, А.А. АВЕРШИН

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

КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

Представлено новое конструктивно–технологическое решение кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) формирующее новый сегмент в общей группе оптических гироскопов. Новизна и оригинальность идеи заключается в том, что КМГ с ПЛД сочетает моноблочную кольцевую оптическую систему с полупроводниковым лазерным диодом в качестве источника лазерного излучения.

N.A. US, S.P. ZADOROZHNY, A.A. AVERSHIN

Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh

RING PACKAGED GYROSCOPE WITH A SEMICONDUCTOR LASER DIODE

The new constructive and technological solution of a ring laser gyroscope with the semiconductor laser diode (KMG with PLD) forming a new segment in the general group of optical gyroscopes is submitted. Novelty and originality of idea is that KMG with PLD combines monoblock ring optical system with the semiconductor laser diode as a source of laser radiation.

Современные беслатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) реализуются на базе оптических гироскопов объединяющих две группы: кольцевые газовые лазерные гироскопы (КЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). В целом они обеспечивают точность измерений в диапазоне 0,01 – 10 град/ч, и имеют следующие особенности:

1) КЛГ – отличается сложностью технологии производства и юстировки, жесткостью конструкции, имеет относительно малый срок эксплуатации, высоковольтный источник питания, большие весогабаритные параметры;

2) ВОГ – отличается упрощенной технологией производства, но относительно малой жесткостью конструкции, что определяет временные и температурные нестабильности, а точностные характеристики зависят от используемого оптоволокна зарубежного производства длиной 200 – 2000 м, это существенно влияет на весогабаритные характеристики устройства.

Предлагаемое конструктивно–технологическое решение кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) формирует новый сегмент в общей группе оптических гироскопов и позволяет создавать высокоточные лазерные гироскопические датчики пространственной ориентации, которые можно интегрировать как в существующие автономные БИНС, так и создавать на их основе новые БИНС. Отличительными признаками КМГ с ПЛД являются простота конструкции, юстировки и технологии производства, жесткость конструкции, низковольтное питание, малые весо-габаритные характеристики и возможность варьирования точностными параметрами модификаций объекта за счет масштабирования моноблока [1, 2].

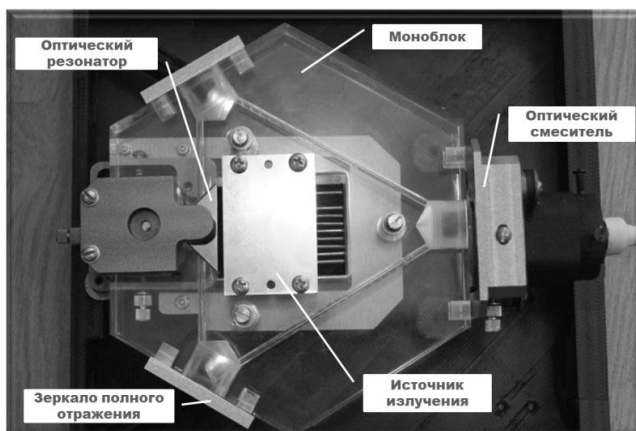


Рис. 1. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом

Разработанный опытный образец КМГ с ПЛД (длина оптического канала 100 мм, рис. 1) предполагает использовать комплектующие, которые могут быть изготовлены на предприятиях РФ, что обеспечивает требования по импортозамещению и снижает материальные затраты при производстве [3].

Список литературы

1. Архипов В.А., Полутов А.Г., Ус Н.А., СклярOVA О.Н., Задорожний С.П., Смирнов П.В. Лазерный гироскоп // Патент России № 2582900. 2016. Бюл.№12.
2. Ус Н.А. Лазерный гироскоп // Патент России № 2507482.2014. Бюл.№5.
3. Ус Н.А. Лазерный гироскоп // Патент России № 2488773.2014. Бюл.№21.

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЛАЗЕРНАЯ ДЕСОРБЦИЯ СЛЕДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В СПЕКТРОМЕТРИИ ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ

В работе с применением масс-спектрометрии исследуется эффективность двух простых лазерных источников для инициирования лазерной десорбции следовых количеств тринитротолуола и циклотриметилентринитрамина. Используется лазер на YAG:Nd³⁺ ($\lambda = 1064$ нм) и диодный непрерывный лазер ($\lambda = 440$ нм). Показано, что импульсный неодимовый лазер является более перспективным для создания устройства бесконтактного пробоотбора для спектрометров ионной подвижности.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LASER DESORPTION OF TRACES OF EXPLOSIVES IN ION MOBILITY SPECTROMETRY

The efficiency of two simple laser sources to initiate laser desorption of traces of trinitrotoluene and cyclotrimethylenetrinitramine is investigated with use a mass spectrometry technique. A YAG: Nd³⁺ laser ($\lambda = 1064$ nm) and a diode continuous laser ($\lambda = 440$ nm) are used. It is shown that a pulsed laser source is more promising for creating a device for contactless sampling for ion mobility spectrometers.

На сегодняшний день в аппаратуре на основе спектрометрии ионной подвижности для обнаружения следов взрывчатых веществ (ВВ) с низким давлением насыщенных паров обычно используются дополнительные устройства ввода пробы. Подход, основанный на использовании лазерного излучения для бесконтактного обследования объектов путем инициирования термодесорбции, представляется перспективным для создания таких устройств как YAG: Nd³⁺ laser ($\lambda = 1064$ нм, $\tau_{\text{имп}} = 16$ нс, $E_{\text{имп}} = 100$ мДж) и полупроводниковый лазер с диодной накачкой ($\lambda = 440$ нм), непрерывный режим генерации, $P_{\text{изл}} = 700$ мВт. Для количественного определения массы вещества, десорбированного лазерным излучением, применялся квадрупольный масс-спектрометр Shimadzu GCMS-GP2010 с возможностью прямого ввода образца и ионизацией электронным ударом. Подготовленный образец помещается на конец модуля, после чего модуль через специальный шлюз вводится в

масс-спектрометр. Лазерный луч проходит через оптические окна и попадает на образец через прозрачную подложку. Образовавшиеся в результате десорбции продукты поступают в ионный источник и анализируются масс-спектрометром. Количество десорбированного вещества определяется по кривой калибровки, полученной в режиме программируемой термодесорбции. В работе использовались следующие нитросоединения: тринитротолуол (ТНТ), циклотриметилентринитрамин (RDX). Раствор исследуемых веществ в ацетонитриле концентрации 10^{-5} г/μL объемом $V = 1$ μL помещался на чистую кварцевую подложку с образованием пятна площадью $S = 0.06$ см², после чего высушивался в течение 3 минут. Использованные образцы представляли собой оптически тонкий слой для всех исследованных в работе длин волн.

Определены оптимальные параметры лазерного излучения, обеспечивающие максимальную эффективность десорбции с поверхности обследуемых объектов в виде частиц и комплексов, по которым возможна однозначная идентификация конкретного вещества для лазера на основе Nd³⁺:YAG с длиной волны $\lambda = 1064$ нм. При интенсивности $q = 1,72 \times 10^9$ Вт/см² средняя масса десорбированного за один импульс вещества составляет 2 - 7 нг.

Использование источника с $\lambda = 440$ нм показало, что его воздействие на ТНТ приводит к десорбции вещества только с 30-й секунды при условии фиксации места облучения. Сравнение двух использованных источников по массе десорбированного вещества на временах более 30 секунд говорит об их сопоставимой эффективности. На меньших временах предпочтительно использование импульсного источника.

В случае RDX использование источника с $\lambda = 440$ нм приводит к десорбции лишь со второй минуты облучения. На таких временах применение импульсного источника оказывается более чем в 20 раз эффективнее при условии обработки им площади пятна, равного площади пятна непрерывного источника за время проведения измерений.

Наличие незначительного выхода оксида азота при воздействии нерезонансным излучением импульсного источника на ТНТ при интенсивностях до 10^9 Вт/см² и его отсутствие для RDX не является препятствием для детектирования десорбированных соединений при помощи спектрометрии ионной подвижности. Небольшая стоимость и габариты неодимового лазера на основной гармонике делает перспективным его применение при создании устройства бесконтактного пробоотбора, совмещенного со спектрометром ионной подвижности.

А.З. ВИНАРОВ, А.М. ДЫМОВ, Н.И. СОРОКИН,
В.П. МИНАЕВ¹, В.Ю. ЛЕКАРЕВ

*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
¹НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино*

О РАЗЛИЧИИ В ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЯГКИЕ ТКАНИ В ГАЗОВОЙ И ВОДНОЙ СРЕДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОКОЛО 2 мкм

Показано, что в отличие от воздействия в воздушной среде, рассечение биоткани в водной среде (физиологическом растворе) происходит парогазовой струей, образующейся в результате сверхинтенсивного кипения в тонком (порядка 0,1мм) слое жидкости, в котором происходит поглощение лазерного излучения. Коагуляция прилегающих к разрезу тканей происходит за счет тепла, выделяющегося при конденсации пара.

A.Z. VINAROV, A.M. DYMOV, N.I. SOROKIN,
V.P. MINAEV¹, V.Yu. LEKAREV

*Sechenov First Moscow State Medical University
¹IRE-Polus Corporation, Fryazino*

ON THE DIFFERENCE IN ACTION OF THE LASER LIGHT WITH WAVELENGTH NEAR 2μm ON BIOTISSUE IN GAS AND WATER MEDIA

It is shown that unlike action in the air environment, section of the biotissue in the water environment (physiological solution) is performed by the steam-gas stream which is formed as a result of superintensive boiling in thin (about 0,1mm) a liquid layer in which absorbed laser radiation. Coagulation of the biotissue, adjacent to a section, happens due to heat which is produced via vapor condensation.

Лазерное излучение с длинами волн 1,94 мкм (Тм в волокне), 2,01 мкм (АИГ:Тм) и 2,1 мкм (АИГ:Но) рассматривается как наиболее перспективное для проведения таких малоинвазивных урологических операций, как трансуретральная энуклеация аденома простаты и удаление немышечноинвазивного рака мочевого пузыря. Это обусловлено высоким его поглощением в воде и крови (рис. 1, [1]).

Материалы и методы. Проводится сравнение характера воздействия лазерного излучения с длиной волны 1,94 мкм (аппарат «Уролаз», НТО «ИРЭ-Полус», Россия) на ткань почки при лапароскопическом сечении в

среде углекислого газа с воздействием при трансуретральных энуклеации аденомы и резекции стенки мочевого пузыря с опухолью, осуществляемых в среде физиологического раствора излучением 1,94 мкм и 2,1 мкм (аппарат «VersaPulse Power Suite P100», «Lumenis», Израиль).

В газовой среде рассечение осуществляется контактно, при этом конец световода раскаляется из-за карбонизации в месте контакта. В этом случае происходит сочетанное воздействие лазерного излучения и раскаленного конца световода [2]. Наблюдается заметная карбонизация места разреза.

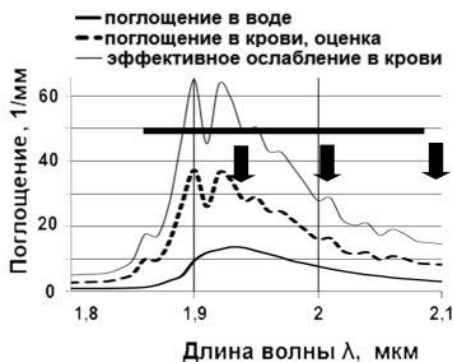


Рис. 1. Поглощение в воде и крови, полоса показывает диапазон, в котором могут генерировать лазеры на волокне, активированном Tm

При работе в среде физиологического раствора лазерное излучение поглощается в тонком слое воды вблизи выходного торца световода и вызывает сверхинтенсивное кипение жидкости, формирующую интенсивную парогазовую струю, хорошо видимую на экране видеоэндоскопа. Эта струя, в свою очередь, рассекает биоткань, вызывая желаемое воздействие. При этом кратковременный разогрев конца световода возникает только в моменты касания световодом рассекаемой ткани. В месте рассечения видны минимальные следы карбонизации. Коагуляция прилегающих к разрезу тканей происходит за счет тепла, выделяющегося при конденсации пара.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант РФФ №16-02-00743.

Список литературы.

1. Минаев В.П. Лазерные медицинские системы и медицинские технологии на их основе: Учебное пособие. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2017.
2. Чудновский В.М., Буланов В.А., Юсупов В.И. Лазерное индуцирование акустогидродинамических эффектов в хирургии // Фотоника. 2010. №1. С.30-36.

А.В. ОРЛОВ, Т.В. БАЙКОВА, Д.Н. БАХМУТОВ¹,
С.А. ГОНЧУКОВ, Т.С. СВИСТУНОВА²

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
¹Московский государственный медико-стоматологический университет
им. А.И. Евдокимова*

*²Инфекционная клиническая больница №2 Департамента здравоохранения города
Москвы*

СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА И ФЛЮОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Приведены результаты экспериментов по исследованию образцов биологических жидкостей с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света и флюоресцентной спектроскопии. Сняты спектры комбинационного рассеяния и флуоресценции различных биологических жидкостей и определены характерные линии, позволяющие проводить сравнительный анализ данных с целью выявления заболевания или патологии.

A.V. ORLOV, T.V. BAIKOVA, D.N. BAKHMUTOV¹,
S.A. GONCHUKOV, T.S. SVISTUNOVA²

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

¹Moscow State University of Medicine and Dentistry

²Infectious Clinical Hospital №2, Moscow

RAMAN AND FLUORESCENT SPECTROSCOPY OF BIOLOGICAL LIQUIDS

The experiment results about the study of biological liquids via Raman and fluorescent spectroscopy are presented. The Raman scattering and fluorescence spectra of different biological liquids were obtained. Furthermore, the specific lines which were identified allow conducting comparative data analysis for disease and pathology detection.

Анализ биологических жидкостей (БЖ) используется для выявления заболеваний и иных отклонений в организме, как наиболее информативный метод исследования. Наличие патологий можно надежно идентифицировать по изменению состава биологических жидкостей на молекулярном уровне.

Данная работа нацелена на выявление биомаркеров заболеваний человека с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР) света в биологических жидкостях. Метод СКР позволяет неинвазивно получать большой объем информации об исследуемом образце, который может иметь малые, вплоть до микронных, размеры и находиться в любом агрегатном состоянии. СКР имеет уникальные возможности в части идентификации вещества, поскольку нет двух молекул, которые имели бы одинаковые спектры КР [1, 2].

В ходе эксперимента были произведены спектральные измерения 30 образцов биологических жидкостей. Исследования выполнялись с помощью спектрометра комбинационного рассеяния модели DXR Raman Microscope и волоконно-оптического спектрометра ЛЭСА. В качестве примера на рис. 1 приведен типичный спектр КР высушенной слюны при его возбуждении лазером с зеленой длиной волны излучения.

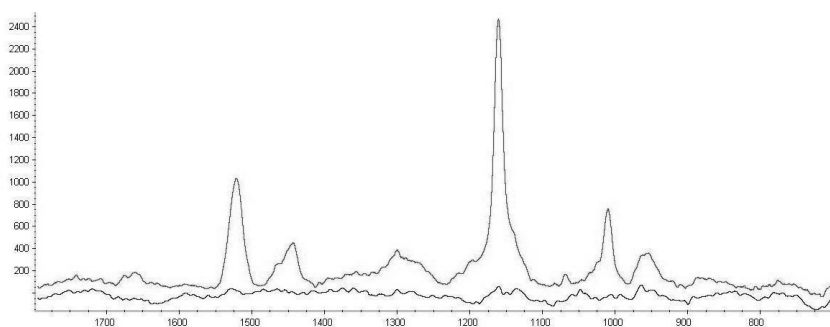


Рис. 1. Типичный спектр КР высушенной слюны при его возбуждении лазером

В отличие от спектра слюны здорового человека (внизу) в случае пародонтита в спектре КР (вверху) появляются характерные линии 1156 см^{-1} и 1524 см^{-1} , обусловленные присутствием в слюне каротиноидов, что свидетельствует о росте антиоксидантных процессов в ответ на развитие патологии в полости рта.

Данная работа поддержана РФФИ (проект № 15-02-08400).

Список литературы

1. Baikova T., Minaeva S., Sundukov A., Svistunova T., Bagratashvili V., Alushin M., Gonchukov S. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V.594. P.012029.
2. Gonchukov S., Baikova T., Alushin M., Svistunova T., Minaeva S., Ionin S., Kudryashov A., Saraeva I., Zayarny D. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.691. P. 012010.

Т.А. ЕФИМОВ¹, А.М. ЗАХАРЕНКО²,
Ю.Н. КУЛЬЧИН¹, Р.В. РОМАШКО^{1,2}

¹*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

ЛАЗЕРНЫЙ БИОСЕНСОР НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

В работе предложен и апробирован лазерный биосенсор на основе микромеханического осциллятора (кантилевера), используемого в качестве чувствительного элемента, и адаптивного интерферометра, построенного по схеме векторного двух-волнового взаимодействия в фоторефрактивном кристалле CdTe, используемого для детектирования колебаний осциллятора. Присоединение молекулы биовещества, подлежащего детектированию, к поверхности осциллятора приводят к уменьшению собственной частоты колебаний последнего. В работе экспериментально продемонстрировано детектирование с помощью лазерного биосенсора молекул БСА общей массой 3.1×10^{-9} г, при этом поверхность кантилевера была пре-активирована смесью NHS-EDC.

T.A. EFIMOV¹, A.M. ZAKHARENKO²,
Yu.N. KULCHIN¹, R.V. ROMASHKO^{1,2}

¹*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

LASER BIOSENSOR BASED ON MICROMECHANICAL OSCILLATOR

In this research, we have proposed a laser biosensor which uses a micromechanical oscillator (cantilever) as a primary sensing element and an adaptive interferometer based on vectorial two-wave mixing in a photorefractive CdTe crystal for detecting the cantilever vibration. Biomolecules of interest being landed to the oscillator surface result in reduction of the oscillator's natural frequency. In the experiment, BSA molecules with net mass 3.1×10^{-9} g were detected by the laser biosensor with a cantilever which surface was pre-activated by NHS-EDC ester.

В настоящей работе предложен лазерный биосенсор, чувствительным элементом которого является микромеханический осциллятор. В качестве осциллятора использован кремниевый кантилевер размером $180 \times 40 \times 7$ мкм³. Колебания кантилевера возбуждались лазерными импульсами на длине волны 532 нм мощностью 150 мкДж, длительностью 5 нс. Детектирование колебаний осуществилось с

помощью адаптивного голографического интерферометра [1, 2]. В качестве источника излучения в интерферометре использован непрерывный Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм, мощностью 20 мВт. Голографический принцип объединения волн в кристалле CdTe:V в ортогональной геометрии векторного двухволнового взаимодействия позволяет обеспечить выполнение и поддержание квадратурных условий, соответствующих максимальной чувствительности интерферометра [1].

Работа биосенсора экспериментально продемонстрирована при детектировании молекул БСА (бычий сывороточный альбумин). Для активации кантилевера на его поверхность наносилась пленка золота толщиной 12 нм, которая обрабатывалась смесью NHS-EDC. После активации кантилевер устанавливался в проточную кювету объемом 4 мл, заполненную раствором Na_2HPO_4 с концентрацией 0,013 М/мл (рис. 1). В ходе эксперимента в кювету вводилось 2,5 мл раствора БСА с концентрацией 5 мг/мл. Вследствие связывания молекул белка с активированной поверхностью кантилевера увеличивалась его масса, и, как следствие, уменьшалась частота собственных колебаний – с 90,1 кГц до 86 кГц в течение 40 минут, что соответствует присоединению молекул БСА массой $(3,1 \pm 0,3) \times 10^{-9}$ г (рис. 2). Несмотря на низкую добротность системы «кантилевер-раствор» ($Q \approx 4$), благодаря применению принципов адаптивной интерферометрии осуществлена устойчивая регистрация частоты собственных колебаний микромеханического осциллятора.

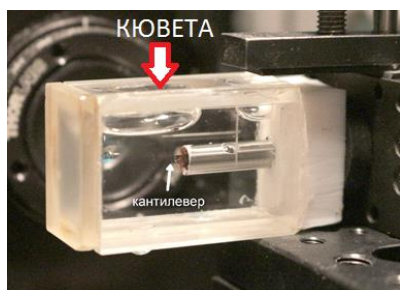


Рис. 1. Фото кюветы с кантилевером, погруженным в исследуемый раствор

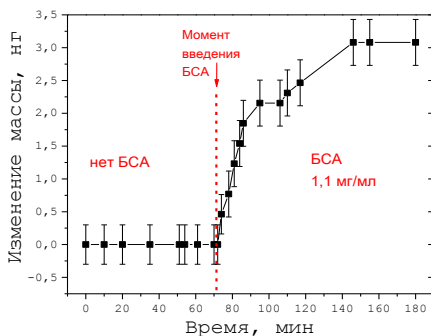


Рис. 2. Динамика изменения массы молекул БСА, присоединяемых к поверхности кантилевера

Список литературы

1. Di Girolamo S., et al. //Optics Communications. 2010. V.283 (1). P.128-131.
2. Romashko R.V., et al. //Measurement Science Review. 2014. V.14 (3). P.160-163.

В.В. ЗАЙЦЕВ, О.В. МАМОНТОВ¹, А.А. КАМШИЛИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

*¹Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова,
Санкт-Петербург*

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО КРОВОТОКА В КОНЕЧНОСТЯХ С ПОМОЩЬЮ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

Приведены результаты эксперимента по исследованию новой модели взаимодействия света с кожей человека для измерения показателей периферического кровотока (ППК) в конечностях бесконтактным оптическим методом. Разработан алгоритм обработки оптических данных для оценки ППК по всей поверхности исследуемой конечности. В результате экспериментов установлена достоверность новой модели взаимодействия света с кожей и установлено, что данные ППК можно получить, оценивая оптический отклик в любой точке на поверхности конечности.

V.V. ZAYTSEV, O.V. MAMONTOV¹, A.A. KAMSHILIN

ITMO University, Saint-Petersburg

¹Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg

MEASURING PERIPHERAL BLOOD FLOW IN THE LIMBS BY MEANS OF PHOTOPLETYSMOGRAPHY

Basing on the recently proposed model of light interaction with human skin, we carried out experiments aimed to measuring peripheral blood flow (PBF) in limbs with a non-contact optical method. An algorithm for processing optical data for estimating PBF over the whole surface of the limb is developed. Experimental results confirm applicability of new model of light interaction with the skin. It was shown that PBF can be obtained from optical response in any point at the limb surface.

Фотоплетизмография основана на обработке видеозаписей выбранной части тела, освещенной некогерентным видимым светом. Традиционная модель интерпретации сигнала фотоплетизмографии основывается на взаимодействии глубоко проникающего в кожу света ИК спектра с крупными пульсирующими артериями [1]. Новые исследования в нашей группе показывают, что даже в свете зелёного спектра, глубина которого недостаточна для взаимодействия с артериями, можно наблюдать ФПГ [2]. Оклюзионная плетизмография является одним из важнейших методов оценки периферического кровообращения у людей.

Для получения данных показателей периферического кровотока была разработана и изготовлена лабораторная установка, позволяющая вести синхронную видеозапись руки в состоянии окклюзии. Схема установки показана на рис. 1. В непосредственной близости от объектива каждой из 4-х видеокамер были расположены по два светодиода (525 ± 60 нм). В ходе эксперимента испытуемый находился в лежачем положении, а его предплечье располагалось посередине между 4-я камерами. При исследовании венозной окклюзии давление в манжете увеличивалось до 40 мм рт. ст. на 15 с, затем сбрасывалось на 10 с, и так 2 раза.

Обработка полученных данных проводилась при помощи специально разработанной программы расчёта изменения интенсивности отражённого света методом главных компонент, применённым к матрице, содержащей данные яркости пикселей в области руки, определённой для анализа (размером около 40×80 мм²). Проведенные эксперименты показали, что у всех испытуемых интенсивность света, отраженного от поверхности руки, падает линейно во времени с момента начала окклюзии и восстанавливается до прежнего уровня после снятия окклюзии. Типичные кривые изменения ФПГ сигнала показаны на рис. 2. Характер изменения медленно меняющейся составляющей ФПГ сигнала практически совпадает по форме с сигналами, регистрируемыми в общепринятых контактных плетизмографах. Этот факт позволяет нам предположить, что скорость изменения ФПГ сигнала на линейном участке после начала окклюзии пропорциональна скорости наполнения предплечья кровью.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

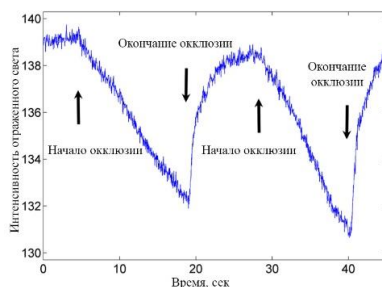


Рис. 2. Типичные кривые изменения ФПГ сигнала

Список литературы

- Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // *Physiol. Meas.* 2007. V.28. P.R1-R39.
- Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P., Romashko R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography // *Sci. Rep.* 2015. No.5. P.10494.

А.Н. ВАСИЛЕНКО, И.У. ПРИМАК, А.В. ХОМЧЕНКО

Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННОГО ИЗУЧЕНИЯ

Представлен метод измерения профиля двулучепреломления в неоднородной анизотропной среде на основе анализа распределения интенсивности рассеянного лазерного излучения

A.N. VASILENKO, I.U. PRIMAK, A.V. KHOMCHENKO

Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

SCATTERED LIGHT MEASUREMENT FOR THE BIREFRINGENCE DISTRIBUTION ESTIMATIONS

The method based on the digital processing of recorded scattered light distribution was proposed enabling the measurement of the birefringence profile in glass.

Одной из важных задач поляриметрии является измерение величины двулучепреломления анизотропных сред, которая становится особенно привлекательной в случае неоднородных анизотропных сред, примерами которых могут служить градиентно-легированные лазерные среды или закаленное стекло. В настоящем сообщении на примере исследования закаленного стекла, имеющего неоднородное по толщине распределение остаточных напряжений, а следовательно и двулучепреломления, представлен метод измерения профиля разности фаз колебаний электрических векторов линейно поляризованных составляющих оптического излучения, прошедшего через двулучепреломляющую среду. Последнее возможно на основе анализа рассеяния света на неоднородностях распределения показателя преломления (рис. 1). Линейно поляризованный световой пучок диаметром 180 мкм от источника 1, пройдя поляризатор 2 и фокусирующую линзу 3, при нормальном падении на боковую грань образца 6 распространяется в нем. В качестве источника света использован лазер с длиной волны 533 нм. Рассеянный свет регистрируется в плоскости перпендикулярной направлению его распространения матрицей фотоприемников 5. Известно, что если направление наблюдения рассеянного света 4 перпендикулярно направлению поляризации 8 падающего света, то интенсивность рассеянного света определяется как [1]

$$I(z, x) = I_0 \cos^2[0.5k_0 B \sigma(z)x],$$

где I_0 – интенсивность света, падающего на образец, $\sigma(z)$ – распределение напряжений в поперечном сечении образца.

Анализ регистрируемых распределений (рис. 1б), построенных при сканировании образца пучком света вдоль оси OZ , позволяет проанализировать величину отклонения луча при распространении его параллельно оси OX (рис. 2) и получить оценки зависимости $\sigma(z)$.

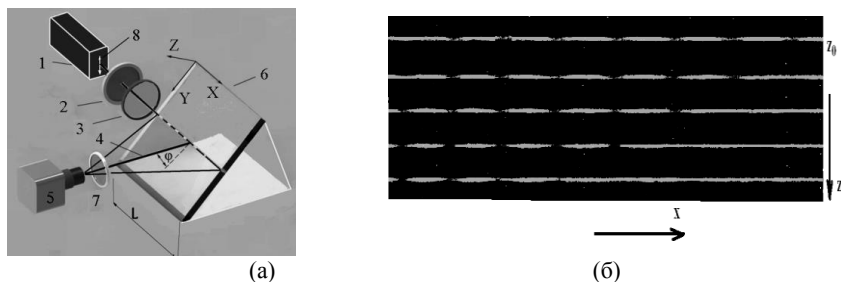


Рис. 1. Схема установки (а) и изменение распределения интенсивности рассеянного света (б) при сканировании образца в направлении оси OZ

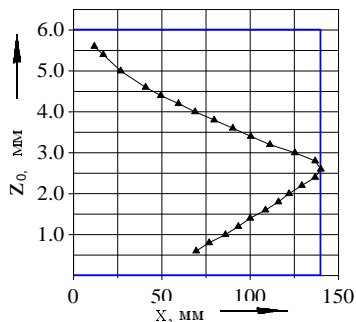


Рис. 2. Зависимость расстояния x , на котором достигается отклонение Δz светового пучка от координаты его точки ввода в образец, от координаты точки ввода z_0 зондирующего пучка в образец для стекла толщиной 6 мм

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет корректно оценивать распределение величины двулучепреломления в анизотропных неоднородных средах.

Список литературы

1. Hödemann S., Valdmann A., Anton J. Murrata T. // Journal Mater Scientific. 2016. V.51. P.5962–5978.

З.А. ЗАБАЛУЕВА, Э.К. НЕПОМНЯЩАЯ,
Е.Н. ВЕЛИЧКО, Е.Т. АКСЁНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ ПОМОЩИ
МЕТОДА ВЗАИМНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ**

В работе предложена схема измерительного стенда для проведения исследования мутных коллоидных растворов и суспензий с целью нахождения распределения по наночастиц размерам методом взаимных корреляций.

Z.A. ZABALUEVA, E.K. NEPOMNYASHCHAYA,
E.N. VELICHKO, E.T. AKSENOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**DEVELOPMENT OF LASER CORRELATION
SPECTROSCOPY BY CROSS-CORRELATION METHOD**

In the work, the scheme of the cross-correlation method for the investigation of turbid colloidal solutions and suspensions for nanosizing is presented.

Метод взаимных корреляций (МВК) является мощным средством при исследовании наночастиц в мутных коллоидных растворах и суспензиях. Он позволяет найти распределение по размерам частиц от нескольких нанометров до нескольких микрон [1]. Как и большинство оптических методов исследования жидкостей, он основан на взаимодействии падающего света с исследуемой средой, в результате чего изменяются параметры светового потока.

Целью нашей работы является разработка схемы измерительного стенда и подбор способа обработки результатов эксперимента, обеспечивающего возможность получения как можно большего количества информации о частицах, взвешенных в исследуемом образце, а также в том, чтобы эта информация была максимально достоверной.

Для нахождения распределения по размерам наночастиц во многих случаях успешно применяется метод динамического рассеяния света. Были проведены эксперименты, в которых он используется для регистрации агрегации и денатурации сывороточного альбумина плазмы крови человека [2]. Он является бесконтактным, не вносящим возмущение

в исследуемую среду и не требует предварительной калибровки с использованием стандартных образцов. Его недостатком является то, что с ростом концентрации рассеивателей появляется сильный вклад от многократно рассеянного света, что делает обработку результатов эксперимента более сложной или вовсе некорректной [3].

МВК решает эту проблему, позволяя выделить только однократно рассеянный свет [4]. Суть метода заключается в одновременном проведении двух экспериментов по динамическому рассеянию на одном и том же рассеивающем объеме (рис. 1). На ячейку с исследуемым образцом падают два лазерных пучка с одинаковой длиной волны. Рассеянный на наночастицах свет регистрируется двумя фотоприёмниками, а полученные сигналы поступают для дальнейшей обработки на компьютер. По двум сигналам строится взаимная корреляционная функция, для которой методом кумулянтов или методом регуляризации Тихонова можно найти сглаженную аппроксимирующую кривую, коэффициенты поступательной диффузии наночастиц и их распределение по размерам [5].

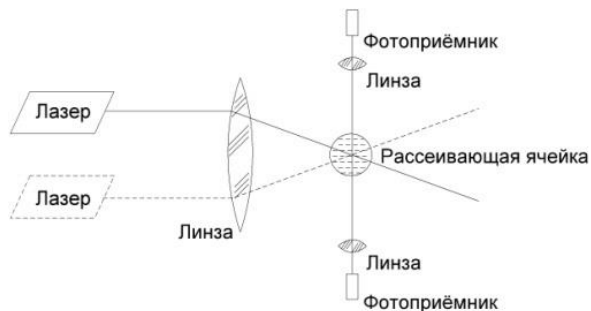


Рис. 1. Структурная схема измерительного стенда

Список литературы

1. Urban C., Schurtenberger P. // J. of colloid and interface science. 1998. V.207. P.150-158.
2. Баранов А.Н., Власова И.М., Салецкий А.М. // Журнал прикладной спектроскопии. 2004. Т.71. №2. С.204-207.
3. Chu B., Fang D., Mao Y. // International journal of molecular sciences. 2015. V.16 (5). P.10016-10037.
4. Непомнящая Э.К., Величко Е.Н., Аксенов Е.Т., Забалуева З.А. // XI Международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии. 2017. С.114-115.
5. Nepomnyashchaya E., Velichko E., Aksenov E. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.769 (1). P.012025.

В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, П.В. МУЛИН, Й.Н. ВИН
*Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ТРЕХ ОСЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

В работе исследовано влияние линейного ускорения на характеристики трех осевого оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей, обеспечивающего измерение угловой скорости в диапазоне ± 360 %/с. Проведен анализ влияния линейного ускорения на смещения кольцевого резонатора в первом и вторых режимах.

V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, P.V. MULIN, YIN NAING WIN
Moscow Aviation Institute (National Research University)

THE ANALYSIS OF LINEAR ACCELERATION EFFECT ON THE CHARACTERISTICS OF THE OPTOELECTRONIC RING THREE-AXIS ANGULAR VELOCITY TRANSDUCER

In this paper presents analysis of linear acceleration effect on the characteristics of the three axis angular velocity transducer, which provide a measurement of the angular velocity in the range of ± 360 %/s. The analysis of linear acceleration effect on the displacement of ring resonator for the primary and secondary modes is shown.

Трех осевой оптоэлектронный кольцевой преобразователь угловых скоростей использует оптический способ съема информации, использующий четыре пары считывающих оптических узлов на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) с переменным зазором между призмой и кольцевым резонатором (КР) (рис. 1). При воздействии линейного ускорения происходит смещение КР (рис. 2). Это смещение КР оказывает большое влияние на выходные характеристики преобразователя угловых скоростей.

В преобразователе оптическое излучение проходит через модуль оптического туннельного эффекта (МОТЭ), взаимодействуя с КР, и достигает фотоприемника. Мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}(\Omega, a) = f\{R_i[d_i(\Omega, a)], P_{\text{ИИ}}\}$ на фотоприемнике зависит от линейного ускорения и измеряемой угловой скорости, которые влияют на

отражательные способности и зазоры МОТЭ. При воздействии ускорения происходит смещение КР без изменения его формы, что приводит к дополнительному несимметричному изменению отражательной способностей противоположных МОТЭ.

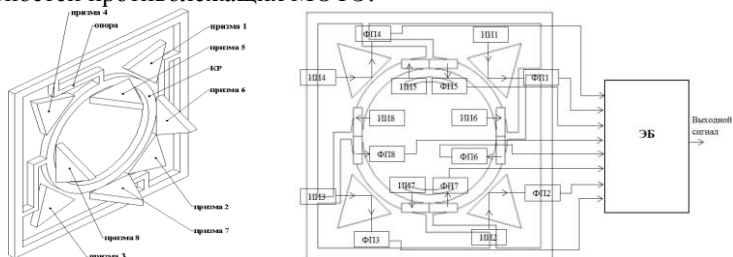


Рис. 1. Кольцевой оптоэлектронный трех осевой преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ виде 3D (слева), структурная схема (справа)

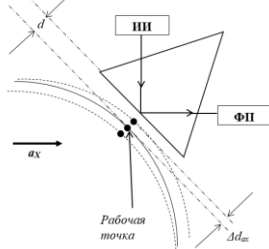


Рис. 2. Смещение кольцевого резонатора при влиянии линейного ускорения

При воздействии линейного ускорения расчет выходной мощности оптического излучения трех осевого преобразователя угловых скоростей выполнен при следующих параметрах: диаметр КР – 5 мм, толщина КР – 300 мкм, ширина КР – 100 мкм, толщина опоры $h_{\text{опор}} = 70$ мкм, ширина опоры $t_{\text{опор}} = 45$ мкм, начальный зазор $d_0 = 500$ нм, длина волны света $\lambda = 900$ нм, угол падения $\theta = 42^\circ$. При воздействии линейного ускорения ($a = 4g$) смещение кольцевого резонатора составляет около 200 нм. Частичная компенсация ускорения может быть произведена сложения сигналы противоположных МОТЭ. При использовании этого метода погрешность влияния линейного ускорения составляет 0,25% / g.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447).

Список литературы

1. Бусурин В.И., Коробков В.В., Йин Наинг Вин // Мехатроника Автоматизация Управление. 2016. Т.17. №5. С.340–346.

А.М. ЦАРЕВА, Р.Х. МАКАЕВА, Д.М. САФИНА

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ В АВИАСТРОЕНИИ

В работе приводятся примеры применения оптического голографического метода в неразрушающем контроле деталей авиационных газотурбинных двигателей.

A.M. TSAREVA, R.Kh. MAKAEVA, D.M. SAFINA

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

THE APPLICATION OF OPTICAL CONTROL METHODS IN AIRCRAFT BUILDING

The examples of application of holographic optical method for non-destructive control of aircraft gas turbine engines parts are presented.

В процессе производства и доводки авиационной техники важным мероприятием является неразрушающий контроль (НК) отдельных деталей и изделий в целом. Своевременное обнаружение дефектов материала, элементов конструкций обеспечивает надежность и исключает вероятность разрушения самолета при дальнейшей эксплуатации. Отраслевыми стандартами предусмотрено внедрение новых методов и технологий контроля. Разрабатываются методы НК с применением голографической интерферометрии [1, 2].

По голографическим интерферограммам можно обнаружить и измерить малые изменения формы поверхности деталей. Наличие какого-либо дефекта приводит к аномальной деформации, которую возможно выявить по форме интерференционных полос в виде резкого изменения кривизны, сдвига или характера их расположения. В большинстве случаев для сравнения с испытываемыми деталями необходимо получение интерферограмм объектов, не имеющих дефектов. При этом виде контроля с целью получения голографических интерферограмм возбуждались колебания объектов на резонансных модах, которые регистрировались методом усреднения по времени. Интерференционные полосы, являющиеся линиями равных амплитуд, при восстановлении голограмм отображали распределение пучностей и узлов стоячей волны.

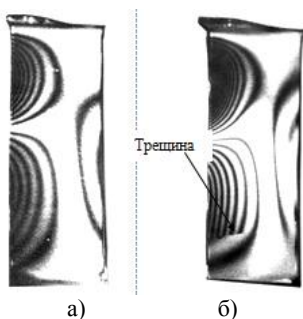


Рис. 1. Резонансная форма колебаний лопатки турбины авиационного двигателя: годная (а); с трещиной (б)

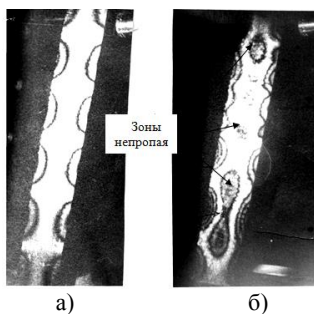


Рис. 2. Контроль непропая сотовых вставок: годная (а); – дефектная (б)

Форма колебания, при которой была выявлена дефектная зона (трещина) лопатки турбины авиационного двигателя, представлена на рис. 1б. В области трещины наблюдается нарушение непрерывности полос. В стационарном состоянии лопатки поверхности вдоль трещины могут соприкасаться, и обнаружение дефекта традиционными методами невозможно. В процессе вибрации происходит раскрытие трещины, что приводит к нарушению контакта. Поскольку метод голографической интерферометрии обладает высокой чувствительностью, дефект визуализируется.

Наиболее распространенные дефекты неразъемных соединений деталей, например, сотовых вставок, – непропаи. Подобные дефекты являются подповерхностными, и выявить их сложно. При вибрациях форма колебаний годной вставки имеет яркую продольную узловую линию с пучностями по краям (рис. 2а). На рис. 2б показана форма резонансных колебаний дефектной вставки. Там, где должна проходить яркая узловая линия, четко выделяются темные участки – зоны дефекта. Возникновение этих зон обусловлено отсутствием связи между пластиной и сотовыми уплотнениями.

Таким образом, применение голографической интерферометрии расширяет возможности неразрушающего контроля деталей.

Список литературы

1. Голографические неразрушающие исследования /под ред. Р.К. Эрфа. М.: Машиностроение, 1979.
2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии. Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011.

Н.В. СУЕТИН

Российский университет дружбы народов, Москва

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МОДУЛЯТОРА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С МОДУЛИРУЮЩИМ БЛОКОМ, СОДЕРЖАЩИМ
ДВЕ ФАЗОВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ**

В работе представлено экспериментальное исследование характеристики устройства для периодической модуляции лазерного излучения. Модулирующий блок устройства представляет собой систему из двух фазовых дифракционных решеток, одна из которых непрерывно движется относительно второй.

N.V. SUETIN

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

**EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF A LASER
RADIATION MODULATOR WITH A MODULATING BLOCK
MADE OF TWO PHASE DIFFRACTION GRATINGS**

The paper presents an experimental study of the characteristics of a device for periodic modulation of laser beam. The modulating unit of the device is a system of two phase diffraction gratings, one of which continuously moves relative to the second one.

Схема модулятора, изображенная на рис. 1, включает лазер 7, модулирующий блок и пространственный фильтр 5. Модулирующий блок состоит из двух прозрачных дисков 1 и 3. На поверхностях дисков нанесены идентичные круговые рельефные фазовые дифракционные решетки (ДР) 2 и 4 с одинаковым периодом Λ , которые расположены по периферии дисков на расстояниях R_G от центров дисков. Линии решеток направлены радиально. Глубина решеток обеспечивает амплитуду ПФМ, близкую к $\Phi_M = 45^\circ$. Диски расположены в параллельных плоскостях на одной осевой линии, на небольшом удалении друг от друга. Один из дисков вращается двигателем 6 относительно второго диска, делая n оборотов в секунду. Для проведения эксперимента были изготовлены сектора дисков с нанесенными ДР, период которых на расстоянии $R_G = 30$ мм от центра диска составлял $\Lambda = 150$ мкм. Был собран макет по схеме на рис. 1. В порядках дифракции были установлены фотодиоды с

резистором нагрузки, включенные в режиме обратного смещения. Форму модулированного оптического сигнала фиксировали при помощи осциллографа с функцией записи сигнала.

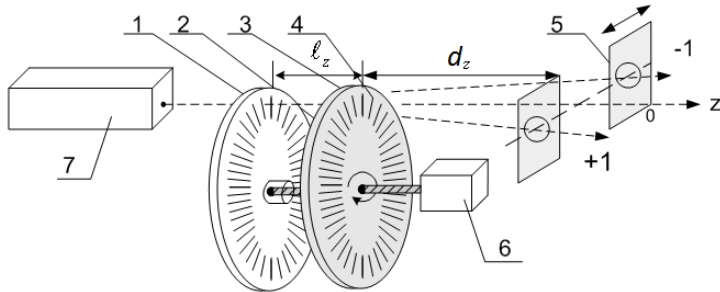


Рис. 1. Схема модулятора с двумя фазовыми ДР с профилем в форме меандра

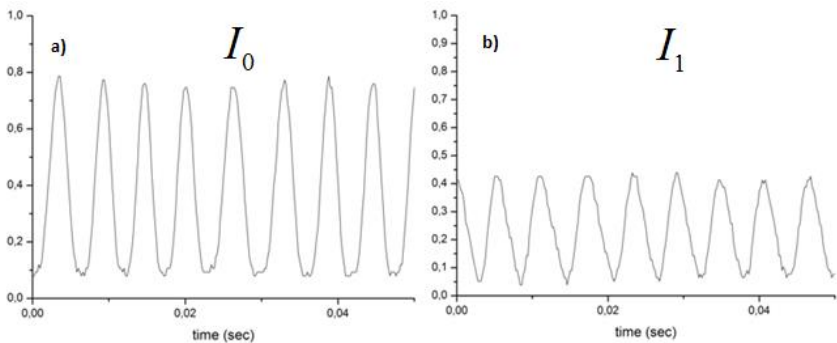


Рис. 2. Экспериментальные модуляционные характеристики модулятора с двумя ДР в нулевом и первых дифракционных порядках

Полученные экспериментальные модуляционные характеристики представлены на рис. 2. Скорость вращения диска в ходе эксперимента составляла $n = 0,15$ об/с, частота модуляции составила $f = 190$ Гц. Глубина модуляции для нулевого порядка дифракции составила величину порядка 80 %. Глубина модуляции мощности для первого порядка составила величину порядка 40 %, при этом форма модуляции близка к гармонической.

Список литературы

1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М. // Вестник РУДН. Серия Физика. 2006. №1. С.90-95.
2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Корольков В.И. // Фотоника. 2011. №1 (25). С.16-19.

П.С. КУДРЯВЦЕВ, Ч. ЛЮ
*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВЫСОТЫ С ПОМОЩЬЮ БЕСКОНТАКТНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ПРОФИЛОМЕТРА

Исследована система прогноза высоты при движения бесконтактного профилометра в процессе работы, которая исключает механический контакт оптического преобразователя приближения с тестируемой поверхностью. Произведено моделирование работы системы прогноза высоты и определены допустимые скорости движения пробы профилометра вдоль поверхности.

P.S. KUDRYAVTSEV, ZHE LIU
Moscow Aviation Institute (National Research University)

INVESTIGATION OF THE FORECAST SYSTEM FOR MEASURING THE HEIGHT WITH A NON-CONTACT SCANNING PROFILOMETER

The height forecasting system is investigated in the process of a non-contact profilometer motion, which excludes the mechanical contact of the optical approximation converter with the tested surface. The work of the altitude forecasting system was simulated and the permissible velocities of the profilometer probe along the surface is presented.

В профилометрах часто используют способ бесконтактного сканирования для получения данных о форме поверхности тел, для обеспечения бесконтактного сканирования, может быть построен на основе использования оптических способов съема информации, в частности с помощью оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [1]. В процессе работы бесконтактного профилометра, оптический преобразователь приближения (ОПП) движется вдоль тестируемой поверхности, не касаясь ее. В процессе движения профилометра вдоль осей OX и OY , если у топографии поверхности есть большой перепад высот, необходимо исключить возможность механического контакта ОПП с поверхностью тела, для чего нужно предусмотреть использование системы прогноза высоты. Система прогноза включает два канала определения высот. Первый канал основан на использовании ОПП с

оптическим туннелированием и обеспечивает прецизионное измерение высот в диапазоне сотен нанометров. Второй канал использует преобразователь перемещения на основе хроматической аберрации, работающий в диапазоне сотен микрометров, например CHR-150 (максимальный диапазон измерения 300мкм), и обеспечивает упреждающую оценку и измерение зазоров по направлению движения в расширенном диапазоне (рис. 1). Исходно преобразователь CHR-150 устанавливается с зазором, равным половине максимального диапазона измерения $d_{\text{прог}} = d_{\text{макс}}/2$. Преобразователь CHR-150 грубо измеряет прогнозируемый зазор d_{chr} . Величина зазора d_{chr} сравнивается с $d_{\text{прог}}$, и, если зазор d_{chr} больше, чем $d_{\text{прог}}$, то система не прогнозирует механический контакт ОПП с телом. Если зазор d_{chr} меньше или равен $d_{\text{прог}}$, то система прогнозирует механический контакт ОПП с телом, и необходимо компенсировать уменьшение зазора $\Delta d_{\text{прог}}$. В процессе компенсации исполнительный пьезодвигатель увеличивает величину перемещения $d_{\text{комп}}$ до величины $(d_{\text{мин}} + \Delta d_{\text{прог}})$ на расчетном шаге движения.

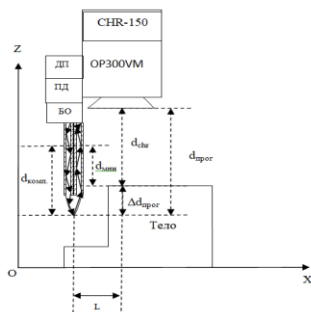


Рис. 1. Структура системы прогноза высоты

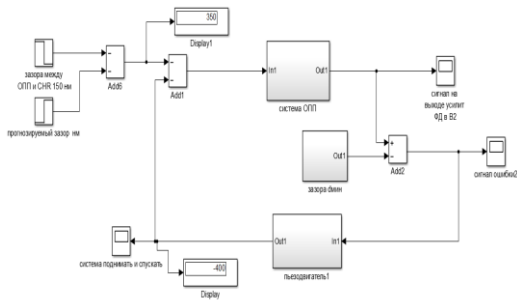


Рис. 2. Моделирование системы прогноза

В результате моделирования системы прогноза (рис. 2) при минимальном зазоре $d_{\text{мин}} = 50$ нм, расстоянии между осями преобразователей $L = 7,6$ мм, прогнозируемом зазоре $d_{\text{chr}} \approx 149,7$ мкм, получено, что величина компенсационного перемещения двигателя должна быть $d_{\text{комп}} = 400$ нм для исключения механического контакта при точном измерении по первому каналу при скорости движения вдоль поверхности не более $0,3$ мм/с.

Список литературы

1. Бусурин В.И., Лю Чжэ, Ахламов П.С., Бердюгин Н.А. Исследование бесконтактного оптического преобразователя приближения мехатронной системы стабилизации зазора сканирующего профилометра // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. №1. С.43-47.

И.Н. ПАВЛОВ, И.Л. РАСКОВСКАЯ, Б.С. РИНКЕВЧИЮС
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С ПРОЗРАЧНОЙ ПОДЛОЖКИ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКЦИОННОГО МЕТОДА

Предложено использовать разработанный лазерный рефракционный метод исследования капель на прозрачных подложках для измерения скорости их испарения. Описаны принцип метода и методика восстановления параметров капли. Приведены результаты экспериментов по измерению скорости испарения капель дистиллированной воды на горизонтальной стеклянной подложке.

I.N. PAVLOV, I.L. RASKOVSKAYA, B.S. RINKEVICHYUS
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

MEASUREMENT OF EVAPORATION RATE OF A LIQUID DROPLET ON A TRANSPARENT SUBSTRATE USING THE REFRACTION METHOD

It is proposed to use the developed laser refractive method of studying droplets on transparent substrates to measure the rate of their evaporation. The principles of the method and techniques for reconstruction of parameters of a droplet are described. The results of experiments of measurement of evaporation rate of a distilled water droplet on a horizontal glass substrate are given.

Рефракционный метод измерения параметров прозрачной капли жидкости, лежащей на прозрачной горизонтальной подложке, разработанный авторами [1, 2], состоит в следующем. Лежащая на подложке капля освещается снизу широким коллимированным лазерным пучком, диаметр которого больше диаметра капли. При этом часть пучка рефрагирует, проходя через каплю, а часть проходит без преломления. На экране, расположенном на пути прошедшего пучка выше подложки, образуется рефракционное изображение, типичный пример которого показан на рис. 1. В центре изображения на фоне светлого неотклоненного пучка видно темное прямотеневое изображение капли, а контур рефрагированной части пучка содержит вогнутые участки различной кривизны, несмотря на то, что на контуре капли подобные участки отсутствуют.

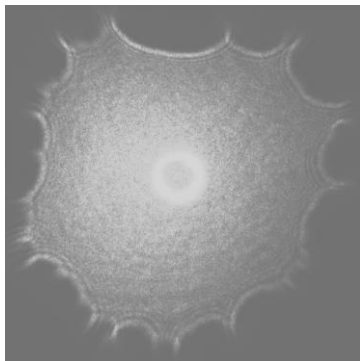


Рис. 1. Типичное рефракционное изображение испаряющейся капли

Средний радиус контура рефракционного изображения на экране зависит от показателя преломления капли, радиуса кривизны ее поверхности, краевого угла смачивания капель подложки и расстояния от подложки до экрана. В работе [1] описана методика восстановления параметров микрорельефа поверхности капли и краевого угла смачивания по измеренным параметрам вогнутостей на рефракционном изображении.

В работе [2] описана модификация разработанного рефракционного метода, в которой используется послойное зондирование капли плоским вертикальным лазерным пучком. Показано, что таким образом можно восстанавливать сечения капли и в итоге получить реальный профиль ее поверхности.

В данной работе предлагается использовать результаты указанных рефракционных методов для измерения скорости испарения. Установлено, что объем испаряющейся капли практически линейно зависит от времени. Это соответствует условию постоянства радиуса основания капли и малому интервалу изменения краевых углов, когда площадь поверхности, с которой происходит испарение, практически не меняется. Для капли радиусом 2,5 мм скорость испарения составила 0,7 мкл/мин, для капли радиусом 2,3 мм, соответственно, 0,5 мкл/мин, что соответствует большей площади испарения в первом случае.

Список литературы

1. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. // ЖЭТФ. 2017. Т.151 (4). С.670–681.
2. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. // ПЖТФ. 2017. Т.43. №13. С.19-25.

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

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

КОГЕРЕНТНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ОБЪЕКТА ПОД СКОЛЬЗЯЩИМИ УГЛАМИ

В работе представлена оптическая схема рентгеновского микроскопа, работающего на отражении от объекта под скользящими углами. С помощью численного моделирования выполнены оценки пространственного разрешения и поля зрения.

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

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

COHERENT X-RAY REFLECTION MICROSCOPY WITH OBJECTS ILLUMINATED UNDER GRAZING ANGLES

An optical scheme of x-ray reflection microscope working at sliding angles of object illumination is presented. Evaluation of the spatial resolution and field of view is performed with numerical modeling.

Для исследования поверхностей различных материалов и процессов на них в нано масштабах естественно получать изображения с помощью микроскопа, использующего отражение от поверхности образца. При этом нужна длина волны, которая сможет обеспечить соответствующее разрешение. В частности, во многих задачах нанопластики и нанотехнологий наблюдения ведутся с помощью рентгеновского излучения с энергией фотонов 0,1 - 10 кэВ. Однако, при таких длинах волн существенная доля излучения отражается лишь при углах, близких к углу полного внутреннего отражения. Таким образом, появляется идея создания рентгеновского микроскопа, работающего на отражении при скользящих углах падения [1]. Оптическая схема предлагаемого в данной работе микроскопа показана на рис. 1.

Результаты численного моделирования пространственного разрешения при длине волны $\lambda = 13.9$ нм, сравнивались с аналогичными, полученными при моделировании отражательного лазерного

рентгеновского микроскопа из работы [1] (рис. 2). Можно сделать вывод, что предложенный микроскоп обладает значительно большим полем зрения.

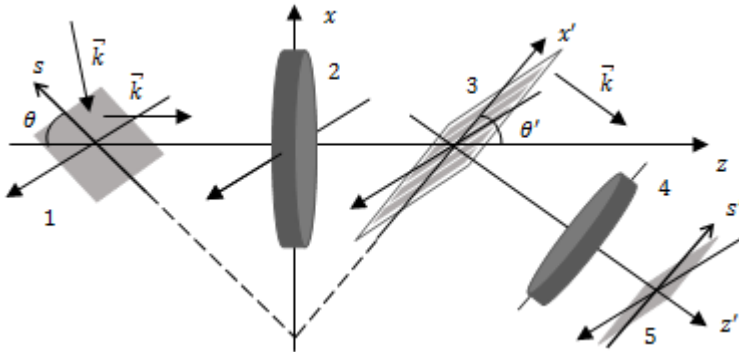


Рис. 1. Оптическая схема рентгеновского микроскопа: 1 - объект, 2 и 4 - линзы; 3 - дифракционная решетка, 5 - изображение (детектор), плоскости объекта и дифракционной решетки являются оптически сопряженными относительно линзы 2

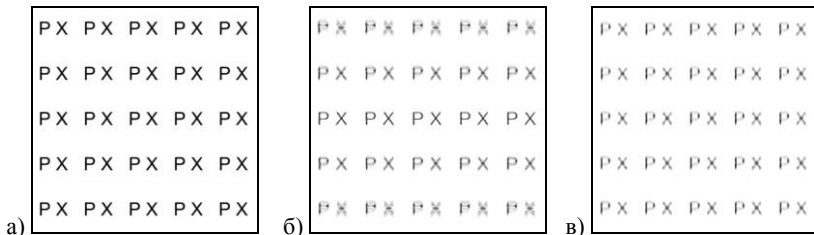


Рис. 2. Тестовый образец (а), изображение образца, рассчитанное по схеме из статьи [1] (б), изображение рассчитанное по предлагаемой оптической схеме (см. рис. 1) (в)

Список литературы

1. Baba M., Nishikino M., Hasegawa N., Tomita T., Minami Y., Takei R., Yamagiwa M., Kawachi T., Suemoto T. Submicron scale image observation with a grazing incidence reflection-type single-shot soft X-ray microscope // Japanese Journal of Applied Physics. 2014. V.53. P.080302.

А.Ю. БЫКОВСКИЙ, А.А. ЩЕРБАКОВ¹

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

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

ПОЗИЦИОННО-ЗАВИСИМАЯ КРИПТОГРАФИЯ В СМЕШАННОЙ СХЕМЕ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ И КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА

Обсуждается схема смешанного квантово-классического защищенного кодирования, позволяющая решить задачу позиционно-зависимой криптографии, нерешаемую методами квантовой криптографии. Проблема актуальна для систем управления автономными мобильными агентами.

A.Yu. BYKOVSKY, A.A. SHERBAKOV¹

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

POSITION-BASED CRYPTOGRAPHY IN MIXED SCHEMES OF MULTIPLE-VALUED LOGIC AND QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The scheme of mixed quantum-classic secret coding is being discussed, which can solve the problem of position-based cryptography, unsolvable by means of quantum cryptography. The problem is actual for the control of autonomous mobile agents.

В рамках квантовой криптографии в настоящее время не удается решить актуальную задачу позиционно-зависимой криптографии [1], связанной с верификацией одним абонентом географического положения другого абонента, или же с гарантированным считыванием данных только для заданных координат на местности [1]. Однако эта задача востребована для защиты систем управления сетевыми системами [2] беспилотного транспорта и автономных роботов.

Для решения этой проблемы предлагается смешанная квантово-классическая схема, в которой (рис. 1), в общем случае формируются два взаимосвязанных потока квантовых и классических данных, где сгенерированный секретный квантовый ключ не только отправляется второму абоненту, но и используется первым абонентом в процедуре классического шифрования, выполняемого методами защищенного многозначно-логического кодирования с помощью секретной логической

функции [3]. Атмосферный канал с квантовым распределением ключа обеспечивает защиту от считывания данных из канала и должен иметь большую производительность в более защищенных вариантах схемы, а в упрощенных версиях может быть ограничен минимальной пропускной способностью. Схема многозначно-логического кодирования [3] с размерностью пространства одноразовых случайных ключей более 10^{600} позволяет работать в открытом канале, аналогично известному алгоритму Диффи-Хеллмана. Коммерческие чипы квантово-оптических генераторов случайных чисел обладают производительностью ~ 1 Мбит/с, что достаточно для обслуживания одновременно квантового и многозначно-логического каналов небольшой производительности, предназначенных для защиты команд управления в сетях автономных мобильных агентов. Подобные европейские разработки на базе протокола IEEE 802.11p и вычислений на эллиптических кривых в настоящее время не позволяют создать гибкую систему ключей и проверки полномочий агентов.

Предлагаемый метод реализации позиционно-зависимой криптографии основан на использовании многопараметрических функций алгебры Аллена-Живона, одновременно описывающих модель многозначно-логического кодирования [3] и логическую модель карты местности [4]. Набор логических переменных для координат и криптографических кодов записывают в единую таблицу истинности многопараметрической функции, имеющей $k = 256$ дискретных значений истинности. Далее записывается и минимизируется логическая функция, позволяющая непосредственно подставлять оцифрованные 8-битные координаты.



Рис. 1. Принцип построения совмещенной схемы каналов квантового распределения ключа и многозначно-логического кодирования для связи с мобильным агентом

Список литературы

1. Broadbent A., Schaffner C., // Designs, Codes and Cryptography. 2016. V.78 (1), P.351.
2. Ullmann M., et. al. // Int. J. on Advances in Security. 2016. V.9 (1&2). P.80.
3. Antipov A.L., Vykovsky A.Yu., et al. // J. of Russian Laser Research. 2006. V.27 (5). P.492.
4. Быковский А.Ю. //Краткие сообщения по физике. 2013. Т.11. С.9.

А.П. ПЛЁНКИН, Ю.Ю. ОГОРОДНИКОВ¹

Южный федеральный университет, Таганрог

*¹Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
Екатеринбург*

ОБ АППРОКСИМАЦИИ ЗАДАЧИ ЦЕЛЬНОЙ ФАКТОРИЗАЦИИ ДЛЯ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

Описана возможность использования частного случая задачи 3-SAT. Приведена новая схема округления, основанная на байесовском обучении. В статье показано, что предлагаемый метод может быть использован для определения безопасности в системах распределения квантовых ключей. В квантовом распределении применяются правила Шеннона, и проблема факторизации имеет первостепенное значение при расшифровке секретных ключей.

A.P. PLJONKIN, Yu.Yu. OGORODNIKOV¹

Southern Federal University, Taganrog

*¹Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAN,
Ekaterinburg*

ABOUT APPROXIMATION OF INTEGER FACTORIZATION PROBLEM FOR QUANTUM CRYPTOGRAPHY

The possibility of using the special case of the 3-SAT problem is described. A new rounding scheme based on Bayesian training is presented. The article shows that the proposed method can be used to determine security in quantum key distribution systems. In the quantum distribution, the Shannon rules are applied, and the factorization problem is of paramount importance when decrypting secret keys.

Целочисленная проблема факторизации (IFP) является известной комбинаторной проблемой, целью которой является разложение скомпонованного числа в произведение меньших простых чисел. Статус сложности IFP остается до сих пор неопределенным. Все известные алгоритмы для решения проблемы факторизации имеют экспоненциальную или субэкспоненциальную временную сложность. Так например алгоритм Полларда или разложение на множители Ферма. На сегодняшний день задача факторизации актуализирована в направлении квантовой криптографии, а именно, в системах квантового распределения ключа [1, 2] в силу их несовершенства. Известно, что системы квантового распределения ключа (СКРК) выполняют правила Шеннона для

абсолютно секретных шифров, однако на практике это не выполняется. Последнее следует из низкой скорости формирования квантовых ключей.

Для известных методов наиболее сложные экземпляры определяются продуктами двух близких простых чисел. Одним из наиболее перспективных подходов к построению алгоритмов для ИФР основан на редукции к 3-SAT [3]. Алгоритм уменьшения экземпляра ИФР к 3-SAT путем кодирования был выведен в работе [4]. Показано, что полученная булева формула удовлетворяет уникальному назначению истинности, соответствующему решению ИФР. Существует множество алгоритмов 3-SAT. В общем виде алгоритмы разделены на два класса: в [5] эти классы называют полными и неполными соответственно.

Таким образом, предлагаемая байесовская схема округления при применении к индуцированным ИФР экземплярам 3-SAT имеет ряд преимуществ, а описанный метод может быть использован для определения безопасности в квантовых системах распределения ключей. При использовании квантовых ключей актуальным является применение правила Шеннона. Учитывая последнее, проблема факторизации имеет первостепенное значение при расшифровке секретных сообщений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-50001\17 мол_нр.

Список литературы

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V.74. №1. P.145-195.
2. Pljonkin A.P. Features of the Photon Pulse Detection Algorithm in the Quantum Key Distribution System // *ICCSP '17 Proceedings of the 2017 International Conference on Cryptography, Security and Privacy*. Wuhan, China, 2017. P.81-84.
3. Crandall R., Pomerance C. *Prime Numbers: A Computational Perspective*. Chapter 5: Exponential Factoring Algorithms. 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 2005.
4. Cook S. The complexity of theorem-proving procedures // *Third annual ACM symposium on Theory of Computing*. New York, 1971. P.151-158.
5. Gu J., Purdom P.W., Franco J., Wah B.W. *Algorithms for the Satisfiability Problem*. Cambridge University Press, 1999.

А.В. ПАВЛОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧЕННОСТИ СВОЙСТВ
РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЩИХ ФРАГМЕНТОВ МЕТОДОМ
НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ**

Дана связь оценки эффективности выделения общих фрагментов в серии образов, записываемых методом наложенных голограмм Фурье, с динамическим диапазоном голографических регистрирующих сред.

A.V. PAVLOV

ITMO University, Saint-Petersburg

**ON THE EFFECTIVENESS OF COMMON PARTS DETECTING
BY THE METHOD OF SUPERIMPOSED FOURIER HOLOGRAMS
IN DEPENDENCE OF THE RECORDING MEDIA PROPERTIES**

Common parts of images series by superimposed Fourier holograms revealing effectiveness in dependence of the dynamical range of recording media is investigated.

Одна из актуальных задач обработки информации – выявление в серии образов общих фрагментов при критерии общности – частоте появления. В статьях [1-3] дано решение задачи методом наложенных голограмм (НГ) Фурье (1), записанных по схеме совместного преобразования (рис. 1)

$$H(v_x) = \sum_{i=1}^n F(S_i(x)) F^*(R_i(x)) \exp(-j2\pi v_x (x_i^R + x_i^S)), \quad (1)$$

где v_x – пространственная частота, F – символ преобразования Фурье, астериск – комплексного сопряжения, экспоненциальный член описывает пространственное положение сигнальных S и опорных R образов при записи, j – мнимая единица. В работе [3] дана аппроксимативная оценка эффективности выявления в зависимости от числа НГ n :

$$V(n) \approx \left[1 + (n-1) \left(m^{(R)} \right)^2 \right]^2 \left[1 + \left(m^{(R)} \right)^4 (n-1) \left(1 + (n-2) \sqrt{\frac{2\kappa}{\Omega^{(S)u}}} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где Ω – оценка информационной емкости соответствующего фрагмента: $\Omega^{(S)u} = S^{(S)u} \pi^{-1} r^{-2}$, S – площадь, r – радиус корреляции. Отсюда следует

зависимость оценки (2) от радиуса корреляции, меняющегося вследствие фильтрации, определяемой свойствами регистрирующих сред (РС).

В работе рассмотрен «спонтанный» сценарий записи НГ, при котором ограниченность динамического диапазона (ДД) с ростом числа НГ n ведет к уменьшению радиуса корреляции за счет ослабления и, затем, режекции низких пространственных частот и, следовательно, должна вести к росту оценки (2). Вместе с тем уменьшение радиуса корреляции имеет следствием превращение ровного фона, к которому стремится свести область различающихся фрагментов данной механизм, в белый шум с соответствующей структурой. Эффект проявляется в том, что вместо роста оценки (2) имеет место её снижение, так как замедляется и затем останавливается снижение дисперсии различающихся фрагментов.

На рис. 2 для НГ, записанных с серии образов с исходным радиусом корреляции $r=10$ пкс, даны оценки: теоретическая (2) и полученные в численных экспериментах: для неограниченного ДД и с ограничением ДД. В последнем случае оптимизация условий записи уже для первой НГ производилась с режекцией нулевой частоты в совместном спектре.

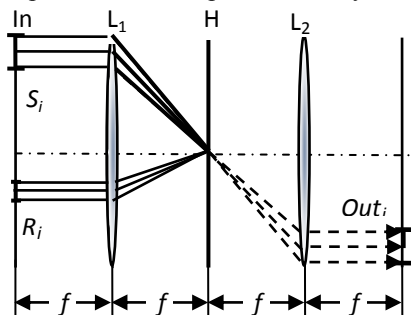


Рис. 1. 4f-схема голографии Фурье при записи наложенных голограмм по схеме совместного преобразования

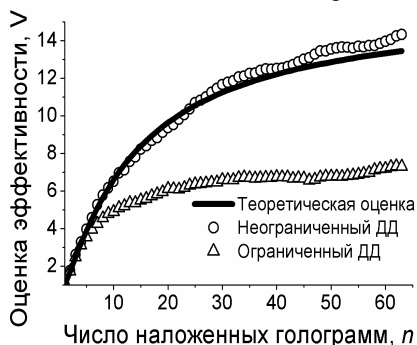


Рис. 2. Зависимость эффективности выявления от числа НГ для объемной РС: линия – теоретическая, точки – численный эксперимент

Из рис. 2 видно, что при малом числе НГ, когда r превышает 3 отсчета, оценки совпадают, по мере уменьшения радиуса корреляции с ростом числа НГ, рост оценки с замедляется за счет шумовой структуры фона.

Работа поддержана РФФИ, проекты 15-01-04111-а и 18-01-00676-а.

Список литературы

1. Павлов А.В. // Известия. ВУЗов. Физика. 2015. V.58(10). С.80-86.
2. Павлов А.В. // Квантовая электроника. 2016. V.46(8). С.759-765.
3. Павлов А.В. // Квантовая электроника. 2017. V.47(4). С.335-342.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.А. КУРБАТОВА, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КВАНТОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ ВЕЙВЛЕТ-СЖАТИИ ВНЕОСЕВЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В работе предложены комбинированные методы сжатия цифровых голограмм, основанные на фильтрации порядков дифракции, вейвлетах и дополнительном сжатии коэффициентов преобразований. Полученные результаты свидетельствуют о возможности сжатия голографической информации более 180 раз при использовании итеративного и неитеративного квантования коэффициентов.

N.N. EVTIKHIEV, E.A. KURBATOVA, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

COEFFICIENTS QUANTIZATION AT OFF-AXIS DIGITAL HOLOGRAM WAVELET COMPRESSION

In paper the combined methods of digital hologram compression based on undesirable diffraction orders elimination, wavelets and additional processing of coefficients are proposed. Obtained results show possibility of 180 and more times compression using iterative and noniterative coefficients quantization.

Для повышения скорости передачи цифровых голограмм и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для их хранения, можно проводить сжатие голограмм. Существуют различные типы методов сжатия голограмм [1-5], в том числе скалярные [1-2], векторные [1-2], основанные на преобразованиях (косинусном, вейвлетном и др. [3-5]).

Для задач сжатия внеосевых цифровых голограмм в работе предложены комбинированные методы, включающие фильтрацию нежелательных порядков дифракции, разделение фурье-спектра голограммы на фазовую и амплитудную составляющие, вейвлет-преобразование обеих составляющих и дополнительное сжатие вейвлет-коэффициентов [5]. Ранее в литературе была рассмотрена только часть указанных этапов и при этом для задач сжатия осевых голограмм [1, 3, 6].

Для анализа вейвлетных этапов сжатия реализованы 14 методов на основе различных преобразований, в частности вейвлетов Хаара, Добеши, Мейера, биортогональных, обратно биортогональных, коифлетов и симлетов. Также реализованы методы дополнительного сжатия вейвлет-коэффициентов, в частности их пороговая обработка и итеративное и

неитеративное квантование. На рис. 1 представлены результаты восстановления экспериментально записанной [7] цифровой голограммы, сжатой вейвлетом Хаара. 70% коэффициентов обнулены по порогу и дополнительно сжаты неитеративно (равномерным квантованием по уровню, рис. 1б, г) и итеративно (методом динамических ядер, рис. 1а, в) Полученные массивы данные сжаты в 182 (а, б) и в 51 (в, г) раз.

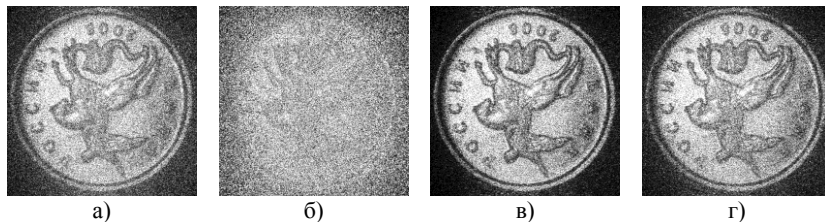


Рис. 1. Восстановленный объект с голограммы, сжатой вейвлетом Хаара с итеративным (а, в) и неитеративным (б, г) квантованием до 2 (а, б) и 6 (в, г) бит

Таким образом, предложены комбинированные методы сжатия цифровых голограмм на основе частотной фильтрации и различной вейвлетной обработки. Получено сжатие экспериментально зарегистрированных голограмм до 180 раз. В зависимости от требуемого качества, скорости и числа градаций, можно отобрать подходящие методы квантования для дополнительного сжатия вейвлет-коэффициентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00389.

Список литературы

1. Dufaux F., Xing Y., Pesquet-Popescu B., Schelkens P. Compression of digital holographic data: An overview // Proc. SPIE. 2015. V.9599. P.95990I.
2. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of Compression of Digital Holograms // Physics Procedia. 2015. V.73. P.328-332.
3. Bettens S., Yan H., Blinder D., et al. Studies on the sparsifying operator in compressive digital holography // Opt. Express. 2017. V.25. P.18656-18676.
4. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N. Methods of compression of digital holograms, based on 1-level wavelet transform // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012071.
5. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Quality of reconstruction of compressed off-axis digital holograms by frequency filtering and wavelets // Appl. Opt. 2018. V.57. Is.1. P.A55-A64.
6. Shortt A.E., Naughton T.J., Javidi B. Compression of digital holograms of three-dimensional objects using wavelets // Opt. Express. 2006. V.14. P.2625-2630.
7. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Demonstration of digital hologram recording and 3D-scenes reconstruction in real-time // Proc. SPIE. 2016. V.9889. P.98891M.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОД АССИМЕТРИЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Предложен метод асимметричного кодирования изображений, основанный на двукратном оптическом кодировании с пространственно-некогерентным освещением, проведено численное моделирование и оценена его эффективность.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

METHOD OF ASYMMETRIC OPTICAL ENCRYPTION OF IMAGES USING SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION

Method of asymmetrical image encryption based on double optical encryption with spatially-incoherent illumination is proposed. Numerical simulation of proposed method and evaluation of its efficiency are performed.

Методы оптического кодирования активно развиваются в последнее время. Всё больше внимания привлекают методы асимметричного оптического кодирования с полностью когерентным освещением, основанные на разделении закодированных изображений на амплитудные и фазовые составляющие. Однако для оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением такие методы не применимы, т.к. фазовая составляющая закодированного изображения не несёт полезной информации и не регистрируется.

Предлагаемый метод асимметричного оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением основан на свойстве коммутативности операции свёртки, лежащей в основе процесса кодирования: $f(i, j) \otimes h(i, j) = h(i, j) \otimes f(i, j)$ и может быть описан следующим образом:

1. Отправитель кодирует исходное изображение I своим ключом кодирования k_1 и отправляет закодированное изображение E_1 получателю.
2. Получатель кодирует полученное закодированное изображение E_1 своим ключом кодирования k_2 и возвращает двукратно закодированное изображение E_{12} отправителю.

3. Отправитель декодирует двукратно кодированное изображение E_{12} с помощью своего ключа кодирования k_1 и отправляет кодированное изображение E_2 получателю;

4. Получатель декодирует кодированное изображение E_2 с помощью своего ключа кодирования k_2 и получает исходное изображение I .

Таким образом, по незащищённым каналам связи передаются только кодированные изображения E_1 , E_{12} и E_2 , но не ключи k_1 и k_2 .

Обе операции кодирования могут быть реализованы оптически, однако это приводит к низкому значению отношения сигнал/шум (ОСШ) декодированного изображения. Более эффективным является оптическая реализация только первой операции кодирования, вторая же осуществляется численно. Тогда второй ключ кодирования не оказывает негативного влияния на ОСШ, и оно зависит лишь от первого ключа.

На рис. 1 представлены примеры исходного, кодированных и декодированных изображений, а так же ключи кодирования.

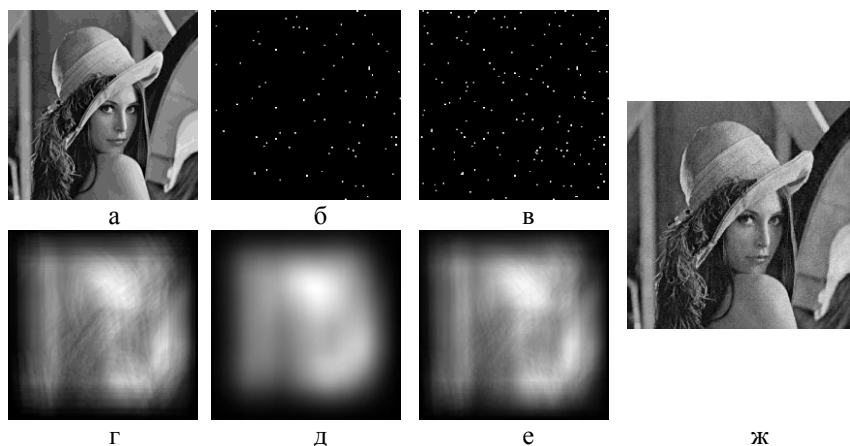


Рис. 1. Исходное (а) изображение, первый (б) и второй (в) ключи кодирования, однократно (г) и двукратно (д) кодированные, а так же однократно (е) и двукратно (ж) декодированные изображения

По результатам численного моделирования получено, что для ассиметричного кодирования с первой оптической, а второй численной операциями кодирования ОСШ декодированного изображения практически не отличается от ОСШ декодированного изображения, полученного в результате стандартного оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением.

П.А. ИВАНОВ

Ярославский государственный технический университет

**КВАДРАТИЧНЫЕ ФИЛЬТРЫ В ЗАДАЧАХ
РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
КОРРЕЛЯТОРОВ**

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, с помощью квадратичных составных фильтров.

P.A. IVANOV

Yaroslavl State Technical University

**QUADRATIC FILTERS IN PROBLEMS
OF IMAGES RECOGNITION WITH USAGE
OF OPTOELECTRONIC CORRELATORS**

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations recognition are given. There were used quadratic distortion invariant correlation filters.

Привлекательным подходом к решению задачи распознавания изображений, полученных при аэрофотосъемке местности или объектов, находящихся в состоянии движения, является применение возможностей оптоэлектроники. Использование оптоэлектронных корреляторов привлекательно, прежде всего, в связи с возможностью реализации параллельных вычислений и высокой производительностью оптики, а также в связи с наличием хорошо разработанной элементной базы как оптической, так и электронной подсистем подобного устройства. Основной функцией данного устройства является вычисление корреляционной функции входных данных с эталонным объектом. Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1].

В данной работе в качестве объекта исследования использовались квадратичные инвариантные корреляционные фильтры (КФ):

$$g(m, n) = \sum_{i=1}^{N_1} \left(F^{-1} \{ F \{ x(m, n) \} * F^* \{ f_i(m, n) \} \} \right)^2 - \sum_{i=1}^{N_2} \left(F^{-1} \{ F \{ x(m, n) \} * F^* \{ b_i(m, n) \} \} \right)^2.$$

Здесь F - преобразование Фурье соответствующего выражения, F^{-1} - обратное преобразование Фурье, знак $*$ - комплексное сопряжение, f_i , b_i - наибольшие положительные и, соответственно, отрицательные собственные вектора (количество первых N_1 , вторых, соответственно, N_2 штук), $x(m, n)$ - подаваемое на вход изображение

Блок-схема реализации фильтра представлена на рис. 1.

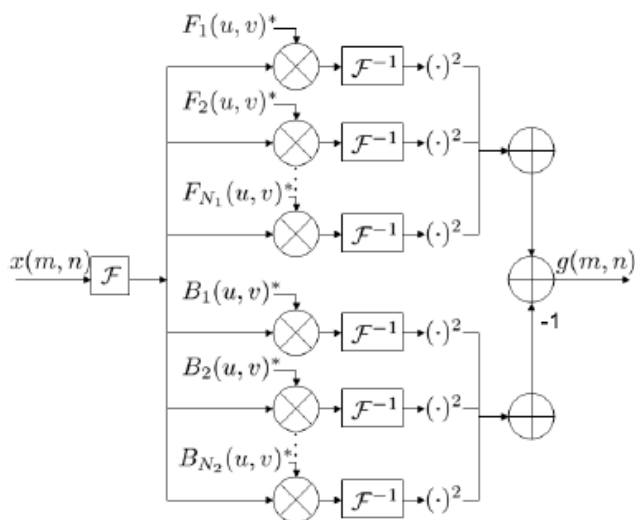


Рис. 1. Блок-схема реализации квадратичного фильтра

Были проведены эксперименты по компьютерному моделированию распознавания изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота и изменению масштаба, а также межклассовому распознаванию изображений. 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.

В.Г. ВОЛОСТНИКОВ¹, Е.Н. ВОРОНЦОВ¹, С.П. КОТОВА^{1,2},
Н.Н. ЛОСЕВСКИЙ¹, Д.В. ПРОКОПОВА^{1,2}, С.А. САМАГИН¹

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

²Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

РАЗРАБОТКА ФАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ 3D ЛОКАЛИЗАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Приведены результаты численного моделирования и экспериментов, проведенных в ходе разработки фазовых фильтров для формирования двухлепестковых световых полей. Данные световые поля можно применять для задач флуоресцентной микроскопии с целью 3D локализации точечных излучателей. Рассмотренные в работе фазовые фильтры получены на основе оптики спиральных пучков.

V.G. VOLOSTNIKOV¹, E.N. VORONTSOV¹, S.P. KOTOVA^{1,2},
N.N. LOSEVSKY¹, D.V. PROKOPOVA^{1,2}, S.A. SAMAGIN¹

¹Samara Branch of the Lebedev Physical Institute

²Samara National Research University

PHASE FILTERS FOR 3D LOCALIZATION OF POINT LIGHT SOURCES

The results presented have been obtained by means of both numerical simulation and experiments being carried out in the development of phase filters aimed to form two-lobe light fields. These light fields can be applied in solving the fluorescence microscopy problems with the purpose of the 3D localization of the point light emitters. The phase filters under consideration are based on the spiral beams optics.

Продольное разрешение оптических флуоресцентных микроскопов может быть увеличено за счет модификации оптической передаточной функции системы таким образом, чтобы изображение точечного объекта менялось с изменением продольной координаты. Такого эффекта можно достичь, введя в систему фазовый фильтр, преобразующий излучение от точечного источника в световое поле с двумя выделенными максимумами интенсивности (гантелеподобное или двухлепестковое поле), вращающееся при распространении [1, 2]. В этом случае продольное положение точечного источника можно определить из ориентации картины, зафиксированной в плоскости регистрации. Данная работа

посвящена поиску пропускания фазового фильтра, позволяющего эффективно осуществить указанное преобразование.

Показано, что сформировать двухлепестковое поле с вращением распределения интенсивности вблизи плоскости фокусировки можно с помощью фазового распределения соответствующего спирального пучка [3]. С использованием разработанного итерационного алгоритма рассчитаны фазовые маски, обладающие высокой энергетической эффективностью [4]. Полученное поле сохраняет свою структуру при фокусировке в области, ограниченной конфокальным параметром. Исследованы особенности формирования световых полей, в том числе при наличии амплитудных и фазовых искажений. На рис. 1 приведены результаты численного моделирования по влиянию амплитудных искажений, на рис. 2 – фазовых искажений.

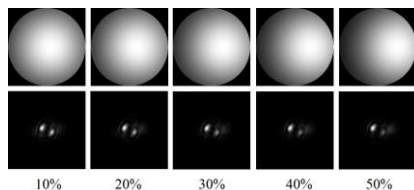


Рис. 1. Освещение фазового элемента смещенным пучком с Гауссовым распределением интенсивности. Верхний ряд – распределение интенсивности освещающего пучка, нижний ряд – полученное изображение в плоскости фокусировки, числа – величина смещения пучка от центра фазового элемента

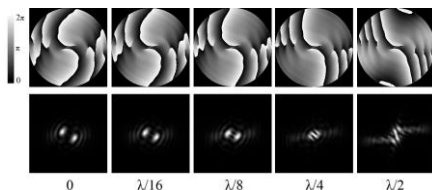


Рис. 2. Влияние астигматизма на формирование двухлепесткового поля. Верхний ряд фазовое распределение в градациях серого (фазовое распределение поля + астигматизм с определенной величиной амплитуды aberrации), нижний ряд – полученные изображения в плоскости фокусировки, числа – величины амплитуды астигматизма

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-11809) и программы ОФН РАН.

Список литературы

1. Pavani S.R.P., Thompson M.A., et. al. // PNAS. 2009. V.106 (9). P.2995-2999.
2. Naumov A.V., Eremchev I.Y., Gorshchev A.A. // European Physical Journal D. 2014. V.68 (11). P.348.
3. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. // Physics-Uspekh. 2004. V.47 (12). P.1177-1203.
4. Volostnikov V.G., Vorontsov E.N., et al. // Bulletin of the RAS: Physics. 2016. V.80 (7). P.766-769.

Б.В. СОКОЛЕНКО, С.И. ХАЛИЛОВ,
А.В. ПРИСЯЖНИУК, Д.А. ПОЛЕТАЕВ

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВИХРЕВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА-ГАУССА

Приведены результаты анализа фазы когерентных пучков, переносящих оптический вихрь, распространяющихся в изотропной среде со сложным микрорельефом поверхности и их применении в микроскопии сверхвысокого разрешения. Определена разрешающая способность микроскопа на основе фазовой сингулярности пучков Лагерра-Гаусса низшего порядка, вертикальное разрешение которого составило 5,27 нм для гелий-неонового лазерного источника.

**B.V. SOKOLENKO, S.I. KHALILOV,
A.V. PRISYAZHNIUK, D.A. POLETAEV**
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

VORTEX INTERFEROMETRIC MICROSCOPY WITH LAGUERRE-GAUSSIAN BEAMS

In the present research, we discuss the results of analysis of coherent light beams carrying an optical vortex and propagating through the isotropic medium with a complex surface microrelief and its application to super resolution microscopy. It was shown, that vertical resolution of a microscope based on the phase singularity of Laguerre-Gaussian beams of low order can be achieved down to 5,27 nm for helium-neon laser source.

Одна из задач оптики, применительно к микроскопии сверхвысокого разрешения – преодоление ограничений, наложенных критерием Релея для оптических систем [1]. Данный предел можно обойти, применяя интерференционный анализ скалярного поля фазы сингулярного пучка, прошедшего исследуемый объект, либо отраженный от него с последующим восстановлением фазы и, как следствие, геометрии профиля поверхности [2].

Целью данной работы является численное моделирование и экспериментальная оценка чувствительности фазы сингулярного пучка Лагерра-Гаусса, распространяющегося в изотропной среде со сложным рельефом поверхности. Фазовый профиль сингулярного пучка чрезвычайно чувствителен к малейшим искажениям, в частности, толщине среды, через которую распространяется такой пучок, что

сказывается на разности оптического хода между опорным и предметным пучками интерферометра [3, 4]. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки: равноплечий интерферометр Маха-Цендера в предметном плече содержит исследуемый образец после пространственного светового модулятора, на который транслируется фазовая неоднородность; в опорном пучке расширитель и пространственный Фурье-фильтр позволяют стабилизировать интерференционную картину, показанную на рис. 2. В качестве образца применялась стеклянная пластинка со ступенчатым профилем высотой 50 нанометров [5].

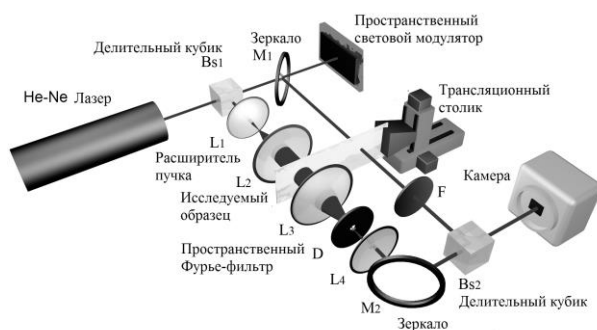


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: $L_{1,2,3,4}$ - линзы, $Bs_{1,2}$ - светоделительные кубики, $M_{1,2}$ - зеркала, F – фильтр, D - диафрагма с диаметром отверстия 1 мм

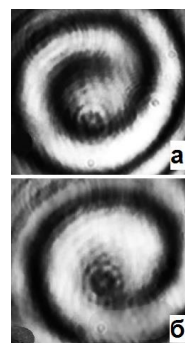


Рис. 2. Интерференционные картины оптического вихря перед ступенью (а) и на ступени (б) образца с толщиной 50 нм

Поворот фазовой спирали образца, наблюдаемый на экспериментальной установке позволил установить разрешающую способность микроскопа на основе сингулярных пучков, которая составила $\lambda/120$, где λ – длина волны лазерного излучения (для He-Ne лазера $\lambda = 632,8$ нм).

Список литературы

1. Wyant J.C., Creath K. // Laser Focus. 1985. P.118-132.
2. Wang W., Yokozecki T., et al. // Opt. Express. 2006. V.14. P.10195–10206.
3. Popiolek-Masajada A., Sokolenko B., et al. // Opt. Lasers Eng. 2014. V.55. P.105–112.
4. Popiolek-Masajada A., Masajada J., Kurzynowski P. // Photonics. 2017. V.4. P.38.
5. Sokolenko B., Poletaev D. // Proc. SPIE. 2017. V.10350. P.1035012.

М.С. КОВАЛЕВ, Г.К. КРАСИН,
С.Б. ОДИНОКОВ, А.Б. СОЛОМАШЕНКО

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

РАСЧЕТ ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕГРАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИНОМОВ ЧЕБЫШЕВА

Рассмотрен метод расчета дифракционного интеграла с обеспечением требуемой точности вычисления за счет применения полиномов Чебышева. Проведено сравнение результатов прямого метода расчета дифракционного интеграла с разработанным в статье методом расчета, основанным на применении полиномов Чебышева. Полученные результаты могут быть использованы при анализе распространения через оптическую систему световых пучков с искаженным волновым фронтом в задаче оптической диагностики.

M.S. KOVALEV, G.K. KRASIN,
S.B. ODINOKOV, A.B. SOLOMASHENKO

Bauman Moscow State Technical University

THE CALCULATION OF THE DIFFRACTION INTEGRAL USING CHEBYSHEV POLYNOMIALS

The method of calculating the diffraction integral ensuring the required accuracy of the calculation using of Chebyshev polynomials are described in present article. Compare the results of the direct method of calculation of the diffraction integral and the developed in the article method of calculation, based on the use of Chebyshev polynomials. The obtained results can be used for the analysis of propagation light beam with a distorted wavefront through the optical system in the problem of optical diagnostics.

В связи с бурным развитием беспроводных систем телекоммуникаций и информатики [1], задач оптической диагностики [2-4], элементов компьютерной оптики [5] требуется анализировать распространение светового пучка с заданными пространственными характеристиками. Как известно, после прохождения светового пучка через оптическую систему происходит нарушение гомоцентричности исходного пучка. Эти изменения связывают с нарушением сферичности волнового фронта исходного пучка и приводят к его искажениям, которые выражаются в отступлении реального волнового фронта от опорной сферы или плоскости и описываются волновыми аберрациями [6].

Поэтому при проектировании современных высокоточных ОЭП необходимо задавать и учитывать различные искажения при численном моделировании распространения или дифракции светового пучка с помощью различных методов, основанных на вычислении дифракционного интеграла.

Существует множество методов решения интеграла Френеля-Кирхгофа, но в большинстве случаев, представляющих практический интерес, из-за математических трудностей приходится прибегать к приближенным или асимптотическим методам. Одними из наиболее известных методов являются методы краевых волн, метод стационарной фазы.

Поэтому является актуальной задача развития теории Френеля-Кирхгофа с целью расширения пределов ее применения и разработки новых методов расчёта дифракционных полей [7].

В настоящей работе приведен сравнительный анализ прямого расчета дифракционного интеграла и расчета на основе полиномов Чебышева. Представление некоторого многочлена через полиномы Чебышева позволяет понизить его порядок и аппроксимировать многочленом меньшей степени, обеспечивая при этом заданную ошибку приближения [8-9].

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение №14.577.21.0258 от 26 сентября 2017 года (идентификатор проекта RFMEFI57717X0258).

Список литературы

1. Gibson G., Courtial J., Padgett M.J., Vasnetsov M., Pas'ko V., Barnett S., Arnold S.F. // *Optics Express*. 2004. V.12. P.5448-5456.
2. Ghebremichael F., Andersen G., Gurley K. // *Appl. Opt.* 2008. V.47. P.A62-A70.
3. Венедиктов В.Ю. // *Фотоника*. 2016. №1 (55). С.132-143.
4. Kovalev M.S., Krasin G.K., Malinina P.I., Odinkov S.B., Sagatelyan H.R. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V.737. P. 012064.
5. Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Харитонов С.И., Пицци М., Перло П. // *Компьютерная оптика*. 2009. Т.33. №2. С.185-192.
6. Русинов М.М. Л.: Машиностроение, 1979.
7. Устинов А.В. // *Компьютерная оптика*. 2009. Т.33. №4. С.412-419.
8. Горгошидзе А.Н. // *Радиотехника и электроника*. 1975. №7. С.1354-1361.
9. Edited by M. Abramovits, I. Stigan. Dover Publications, 1972.

Т.И. АРСЕНЬЯН¹, А.В. БЛАНК^{1,2}, О.М. ВОХНИК¹,
В.С. КОНОНЕНКО¹, Н.А. СУХАРЕВА¹, В.Ю. ТУГАЕНКО²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
²Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Королев

НЕРАВНОВЕСНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА АНСАМБЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ

Представлен термодинамический подход к описанию состояния протяженного открытого оптического канала. Экспериментальные результаты получены на слабо наклонной трассе протяженностью более 1000 метров. Для интерпретации и прогнозирования структуры рефракционных искажений использован аппарат неэкстенсивной статистической механики, в частности, профили спектров неэкстенсивной энтропии Реньи как функции внутренней энергии.

T.I. ARSENYAN¹, A.V. BLANK^{1,2}, O.M. VOKHNIK¹,
V.S. KONONENKO¹, N.A. SUHAREVA¹, V.Yu. TUGAENKO²

¹Lomonosov Moscow State University
²S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev

NON-EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS OF THE ENSEMBLE OF COHERENT WAVE BEAMS

Thermodynamical approach to the description of the state of the long distance free space optical channel is presented. The experimental results were obtained using the slightly slant path of approximately 1000 m length. The interpretation of the results as well as the prediction of the refractive distortions structure was carried out with the help of nonextensive statistical mechanics apparatus, particularly the profiles of nonextensive Renyi entropy considered to be a function of the system internal energy.

Открытый оптический канал рассмотрим как совокупность находящихся в режиме тепло- и массопереноса элементарных объемов, в каждом из которых на заданном интервале времени успевает установиться термодинамическое равновесие с больцмановским фактором β . Для рассматриваемого разбиения трассы допустимо определить распределение вероятности для больцмановского фактора $p(\beta)$, удовлетворяющее условию нормировки и согласующееся с общепринятыми физическими моделями [1]. Анализируемые экспериментальные выборки представляют последовательности кадров распределения интенсивности, регистрируемые с частотой не менее 1 кГц и экспозицией не более 20 мкс.

Кадр экспериментальной выборки соответствует элементу статистического ансамбля и может быть рассмотрен как реализация двумерного стохастического процесса. В грубом приближении выполним степенную аппроксимацию зависимости суммарной засветки ячейки от её линейного размера $I_i(l) \sim l^{\alpha_i}$, здесь параметр аппроксимации α_i - коэффициент сингулярности. Введем спектр распределения коэффициента сингулярности следующим образом: $N(\alpha) \sim l^{-f(\alpha)}$, величина f в математической литературе определена как размерность Хаусдорфа, зависимость $f(\alpha)$ - спектр сингулярности [2, 3]. В процессе обработки больших серий было обнаружено качественное совпадение определяемых для различных кадров параметров профилей спектров размерностей в фиксированных термодинамических режимах и для заданной геометрии трассы.

Определим обобщенную статистическую сумму $Z(q, l)$ для рассматриваемого ансамбля следующим образом:

$$Z(q) = \sum_{i=1}^{N(l)} P_i^q(l) \sim l^{-\tau(q)}, \text{ здесь } P_i(l) - \text{ мера элемента покрытия, в частном}$$

случае суммарная интенсивность. Зависимость обобщенной статистической суммы от значения параметра масштабирования q в общем случае можно аппроксимировать степенной функцией, вводя понятие обобщенной фрактальной емкости или размерности, $D_q - Z(q) \sim l^{(q-1)D(q)}$ при $q = 1$.

Используя связь $(q, \tau(q))$ и $(\alpha, f(\alpha))$ через преобразования Лежандра вида $\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}$, $f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$, можно определить соответствие параметров суперстатистики и мультифрактальных характеристик: $-q$ - обратная больцмановская экспонента, $\tau(q)$ - свободная энергия системы, α - внутренняя энергия, $f(\alpha)$ - энтропия системы.

Предложенный в работе метод оценки "меры неравновесности" через изменение профиля спектра энтропии Реньи не требует процедуры накопления временного ряда мгновенных значений интенсивности и может быть альтернативным параметром для оценки и прогнозирования качества работы открытого оптического канала передачи данных.

Список литературы

1. Beck C., Cohen E.D.G. Superstatistics // Physica A. 2003. V.322. P.267.
2. Hasley T.C., Jensen M.H., Kadanoff L.P., Procaccia I., Shraiman B.J. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets // Physical Review A. 1986. V.33. P.1141.
3. Renyi A. Probability Theory. Amsterdam-London, New York: North-Holland, Elsevier, 1970.

П.В. КОРОЛЕНКО, Р.Т. КУБАНОВ, Ю.В. РЫЖИКОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ФОТОНИКА: ЭСТЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Проанализированы физические причины, определяющие эстетическое восприятие фрактальных объектов. Показано, что к основной из них следует отнести масштабную инвариантность пространственных спектров, которая присуща многим фрактальным структурам, используемых при решении задач современной фотоники. Инвариантность, позволяет эффективно реализовывать механизм частотной фильтрации в коре головного мозга человека, вызывая у него чувство внутренней гармонии и красоты. Указывается, что эмоциональный фон при восприятии фрактальных объектов играет важную эвристическую роль при осуществлении научно-исследовательской деятельности.

P.V. KOROLENKO, R.T. KUBANOV, Yu.V. RYZHIKOVA
Lomonosov Moscow State University

PHOTONICS: AESTHETIC ASPECT

The physical aspects that determine the aesthetic perception of fractal objects are analyzed. Particular attention is paid to the study of scale invariance of spatial spectra. It is inherent in many fractal structures used for solving the problems of modern photonics. Invariance allows to effectively implement the mechanism of frequency filtering in the cerebral cortex of a person causing him a sense of inner harmony and beauty. It is pointed out that the emotional background when perceiving fractal objects plays a positive heuristic role in the implementation of research activities.

Структуры с фрактальной геометрией широко используются в современной фотонике. В литературе помимо описания оптических свойств фрактальных объектов (см., например, [1]) нашли освещение эффекты, связанные с их эстетическим воздействием на человека [2]. Несмотря на то, что в последние годы с использованием современных научных методик и подходов сформировался обширный объем сведений о психологических, нейронных и биохимических процессах, сопутствующих формированию чувства красоты при созерцании фрактальных изображений, механизм возникновения эстетического наслаждения остается неизученным. Вместе с тем наличие эстетической составляющей в разрабатываемых устройствах фотоники играет роль важного критерия их функциональных возможностей.

Целью данной работы является установление на основе численного моделирования физических факторов, играющих определяющую роль в возникновении чувства красоты и прекрасного. Для решения поставленной задачи были привлечены положения современной нейропсихологии, согласно которым зрительная часть коры головного мозга человека содержит нейронные комплексы, которые осуществляют спектральный анализ параметров зрительных сигналов. Причем существует, по-видимому, множество относительно "узких" фильтров, настроенных на восприятие разных пространственных частот. Если в разных спектральных интервалах форма распределения пространственных частот совпадает, то обработка сигнала происходит быстро и с малыми затратами энергии. Это формирует чувство комфорта, вызывающее возбуждение в коре головного мозга центров удовольствия, сопряженных с ощущением красоты. Наличие же эстетической компоненты улучшает креативные способности индивидуума.

В рамках данной работы был собран обширный материал, характеризующий связь изображений фрактальных структур с их пространственными спектрами. Рассматривались различные типы фрактальных и фракталоподобных объектов и процессов, а также определялись соответствующие им спектральные характеристики. Особое внимание было обращено на свойства фрактальных элементов, используемых в качестве инструментальной базы фотоники (апериодические решетки и многослойные системы, фрактальные фокусаторы и антенны [3-5]). Как правило, структуры с фрактальными признаками характеризовались самоподобными спектрами. Это указывает на то, что их изображения формируют в силу указанного выше механизма обработки оптической информации положительный эмоциональный фон, способствующий на креативном уровне решению важных физических задач.

Список литературы

1. Короленко П.В., Грушина Н.В. Золотое сечение и самоподобные структуры в оптике. М.: Книжный дом «Либроком», 2009.
2. Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. М.: Мир, 1989.
3. Korolenko P.V., Mishin A.Yu., Ryzhikova Yu.V. // *Physics of Wave Phenomena*. 2013. V.21. №1. P.68.
4. Gridchina V.V., Korolenko P.V., Ryzhikova Yu.V. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015. V.79. No.12. P.1480.
5. Короленко П.В., Логачев П.А., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // *Физические основы приборостроения*. 2014. Т.3. №3. С.66.

П.А. КУЗНЕЦОВ², И.С. МОЩЕВ^{1,2}, А.Н. КУЗНЕЦОВ²

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

²*АО «НПО «Орион», Москва*

РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА КОРОТКОВОЛНОВЫХ ИК ФПУ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ВРЕМЕНИ НАКОПЛЕНИЯ

Приведен простой в топологической реализации и эффективный способ расширения динамического диапазона, основанный на автоподстройке времени накопления индивидуально в каждой ячейке интегральной схемы считывания. При этом сохраняется высокая крутизна и линейность преобразования в накопительных ячейках с умеренной освещенностью (до 50-70 % от максимального сигнала), но снижается чувствительность в ячейках, близких к насыщению. В результате, формируется линейно-логарифмическая передаточная характеристика, обеспечивающая расширенный динамический диапазон. Приводятся примеры полученных изображений с расширенным динамическим диапазоном в коротковолновом ИК спектре.

P.A. KUZNETSOV², I.S. MOSHCHEV^{1,2}, A.N. KUZNETSOV²

¹*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)*

²*Orion R&P Association, Moscow*

DYNAMIC RANGE EXPANSION IN SHORT-WAVE IR FPA BY AUTO-TUNING OF THE INTEGRATION TIME

The paper proposes a simple topological implementation and an effective way of expanding the dynamic range, based on the auto-adjustment of the integration time individually in each cell of the ROIC. The steepness and linearity of conversion are preserved in cells with moderate illumination (up to 50-70 % of the maximum signal), at the same time sensitivity decreases in cells close to saturation. As a result, a linear-logarithmic transfer characteristic which provides an extended dynamic range is formed. Examples of obtained images with an extended dynamic range in the short-wave IR are shown below.

Особенностью функционирования фотоприемных устройств (ФПУ) в коротковолновом ИК-диапазоне является необходимость регистрации изменений освещенности на четыре-пять порядков в пределах наблюдаемой сцены. Накопительные ячейки интегральных схем считывания фотосигнала с линейной передаточной характеристикой не в состоянии обеспечить детальную передачу столь высококонтрастного

изображения. В связи с этим, к накопительным ячейкам предъявляются повышенные требования по величине динамического диапазона.

В общем случае динамический диапазон устройства определяется как отношение максимального входного сигнала к среднеквадратичному отклонению входного шума. Расширение динамического диапазона является одной из основных тенденций развития современных ИК ФПУ [1-3].

В работе обосновывается необходимость расширения динамического диапазона в ФПУ коротковолнового ИК-спектра. Традиционно применяемые способы обладают низкой эффективностью, в особенности, в крупноформатных матрицах с шагом не более 15 мкм. Наибольшей эффективностью расширения динамического диапазона (до 100 дБ) обладают накопительные ячейки с индивидуально изменяемой передаточной характеристикой в зависимости от яркости фрагментов наблюдаемой сцены.

Так же приводятся примеры полученных изображений без расширенного динамического диапазона (рис. 1) и с расширенным динамическим диапазоном (рис. 2) в коротковолновом ИК-спектре.

Целью работы является предложение, обсуждение и экспериментальная проверка способа расширения динамического диапазона накопительных ячеек за счет индивидуальной подстройки их времени накопления. Особенностью предлагаемого способа является внешнее управление динамическим диапазоном в широких пределах (60-100 дБ).



Рис. 1. Изображение со стандартного МФПУ



Рис. 2. Изображение с МФПУ с автоподстройкой времени накопления

Список литературы

1. Burlakov I.D., Grinchenko L.Yu., et. al. // Usp. Prikl. Fiz. 2014. V.2 (2). P.134.
2. Borodin D.V., Osipov Yu.V., Vasilev V.V.. // Proceeding of the XIII International Conference «Television: Images Broadcasting & Processing». Saint Petersburg 2016.,
3. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. 2012. V20. P.279.

А.П. ВЛАДИМИРОВ^{1,2,3}, Ю.А. МИХАЙЛОВА^{2,3},
Н.А. ДРУКАРЕНКО¹

¹*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

²*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

³*Екатеринбургский научно-исследовательский институт вирусных инфекций*

ДИНАМИЧЕСКАЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Приведены результаты экспериментов по применению метода динамической спекл-интерферометрии для изучения микро- и макропроцессов, протекающих в живой клетке и при многоциклового усталости металлов. Определены параметры динамики спеклов, характеризующие процессы в металлах и активность клеток.

A.P. VLADIMIROV^{1,2,3}, Yu.A. MIKHAILOVA^{2,3},
N.A. DRUKARENKO¹

¹*Institute of Engineering Science, UB RAS, Ekaterinburg*

²*Ural Federal University, Ekaterinburg*

³*Ekaterinburg Research Institute of Viral Infections*

DYNAMIC SPECKLE-INTERFEROMETRY OF TECHNICAL AND BIOLOGICAL OBJECTS

Experimental results on the application of the dynamic speckle-interferometry method in studies of micro-and macroprocesses occurring in high-cycle fatigue of metals and in living cell are presented. Parameters of speckle dynamics, characterizing processes in metals and cell activity, are determined.

Спеклы (от англ. *speckle* – пятно) случайного размера и яркости наблюдаются при освещении шероховатого или прозрачного (с использованием диффузора) объекта когерентным излучением. Наблюдаемая в свободном пространстве и в плоскости изображения объекта картина спеклов является результатом взаимной интерференции многих волн со случайными амплитудами и фазами. При перемещении, деформации объекта или его повреждении имеет место смещение спеклов в пространстве и изменение структуры спекл-поля – динамика спеклов.

Целью работы является применение метода динамической спекл-интерферометрии для изучения микро- и макропроцессов, протекающих в живой клетке и при многоциклового усталости металлов.

В работах [1, 2] для отражающего и тонкого прозрачного объектов представлена теория и методика, позволяющие по спекловым изображениям изучать изменения средних значений, дисперсии и времена релаксации разности оптических путей волн.

1) Объектами исследования усталости являлись призматические образцы размером 5x10x55 мм из оргстекла марки «Асгута» и образцы из конструкционной стали 09Г2С. С целью локализации места возможного зарождения усталостной трещины на образец был нанесен острый V-образный надрез глубиной 2 мм и радиусом в вершине 0,25 мм.

По изменению коэффициента корреляции фрагментов спекловых изображений и методом эллипсометрии показано, что результатом усталостного повреждения оргстекла является уменьшение плотности.

Показано хорошее совпадение микроскопических и макроскопических изменений поверхности, найденных по динамике спеклов и методами профилометрии. Преимуществом определения длины и скорости роста усталостной трещины по корреляции спекловых изображений является возможность применения метода к образцам с шероховатой поверхностью, для которых выявление трещины оптическими методами затруднено.

2) Ранее метод был успешно применен для исследования метаболической активности трех клеточных культур L-41, Vero и ЛЭЧ-3, зараженных вирусом простого герпеса первого типа [2] и в отсутствие вируса [3]. Показано, что наличие вируса в клетках можно обнаружить через 10 минут после начала эксперимента. Оценена реакция клеточной культуры L-41 на изменение температуры от 26 до 37 °С [4].

В качестве параметра, характеризующего метаболическую активность клеток, использовали среднеквадратическое отклонение разности оптических путей волн σ_u , зондирующих клетки.

В данной работе продемонстрированы возможности метода для изучения процессов, происходящих в разных частях отдельной живой клетки, а именно в цитоплазме и ее ядре.

Список литературы

1. Vladimirov A.P. // Optical Engineering. 2016. V.55(12).
2. Vladimirov A.P. et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2015. V.57(8). P.584-588.
3. Vladimirov A.P. et al. // Biomedical Engineering. 2014. V.48(4). P.178-181.
4. Mikhailova Yu.A. et al. // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V.21(1). P.56-64.

П.В. ПАВЛОВ, А.Н. МАЛОВ¹, А.В. НЕУПОКОЕВА²

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

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

²*Иркутский государственный медицинский университет*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматриваются результаты экспериментального исследования и пути практической реализации способа контроля рабочих жидкостей по анализу параметров цифровых спекл-изображений.

P.V. PAVLOV, A.N. MALOV¹, A.V. NEUPOKOEVA²

Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh

¹*Irkutsk National Research Technical University*

²*Irkutsk State Medical University*

DETERMINATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF WORKING LIQUIDS BY DIGITAL SPECL IMAGES PARAMETERS ANALYSIS

The experimental research results and practical realization ways of the method for working fluids testing by analyzing the digital speckle photograph parameters are considered.

Немаловажную роль в обеспечении безопасности полетов авиапарка авиации РФ играет поддержание в исправном состоянии топливных, гидравлических и масляных систем летательных аппаратов. От качества рабочих жидкостей (гидравлическое масло, моторное, авиационное топливо) полностью зависит исправность воздушного судна и как следствие безаварийность полетов.

Проанализировав правовую оценку существующих способов и методов контроля различного рода жидкостей [1-5], в работе предлагается использовать новый способ определения состояния жидкости, суть которого заключается в определении характеристик результирующих распределений интенсивностей (спекл-изображений) регистрируемых в результате прохождения спекл-поля через контролируемые жидкие пробы данной среды. Для этого определяют параметры спекл-изображения (коэффициент автокорреляции, энергетический спектр и т.д.),

зарегистрированных от жидкой пробы в возмущенном состоянии жидкости и в состоянии ее покоя.

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что после отбора пробу перемешивают, формируют спекл-поле лазерного излучения, регистрируют спекл-изображение лазерного пучка, прошедшего через контролируемую жидкость; выдерживают некоторое время до полного оседания примесей в пробе жидкости и повторно регистрируют спекл-изображение, а оценку параметров примесей проводят по значению коэффициента корреляции двух спекл-изображений, зарегистрированными в возбужденном состоянии пробы жидкости и в состоянии её покоя.

Для реализации предлагаемого способа была подготовлена экспериментальная установка, а в качестве инструмента обработки спекл-фотографий на основании предложенного алгоритма обработки спекл-фотографий был разработан специализированный программный модуль. В качестве языка программирования использовался Java SE.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что предлагаемые алгоритмы обработки спекл-фотографий, используемые в специализированном программном обеспечении и разработанная установка, позволяют по изменению параметров регистрируемых спекл-фотографий производить оценку состояния авиационного топлива и моторного масла. Применение выбранного способа к контролю рабочих жидкостей требует дальнейшей проработки и выработки методик контроля для конкретной жидкости.

Список литературы

1. Суслин М.А., Прищепенко В.В., Мелькумов В.Н. Исследование потерь в различных видах топлива с растворенной и эмульсионной влагой на сверхвысоких частотах // Измерительная техника. 2016. №3. С.68-71.
2. Казьмин А.И. СВЧ-метод и устройство аналитического экспресс-контроля качества авиационного топлива // Электронный журнал «Груды МАИ». Выпуск № 4.
3. Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. Т.1.
4. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. Адаптивные методы обработки спекл- модулированных оптических полей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
5. Vovk T.A., Petrov N.V. Correlation characterization of particles in volume based on peak-to-basement ratio // Scientific reports. 2017. Т.7.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Т.Д. ТЫНЬШОВА,
Д.А. ИСМАЙЛОВ, Н.М. КУЛМУРЗАЕВ

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,
Кыргызская Республика*

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ФАЗОВЫХ И ОТРАЖАЮЩИХ СРЕД

В докладе представлена модернизированная схема многоканального голографического интерферометра для исследования сложных фазовых сред. Модернизация позволила использовать интерферометр для изучения отражающих объектов.

Y.K. ISMANOV, T.D. TYNYSHOVA,
D.A. ISMAILOV, N.M. KULMURZAEV

*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of NAS KR,
Bishkek, Kyrgyz Republic*

MULTICHANNEL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER FOR STUDYING COMPLEX PHASE AND REFLECTING MEDIA

The report presents a modernized scheme of a multichannel holographic interferometer for studying complex phase media. Modernization made it possible to use an interferometer to study reflecting objects.

Рассмотренная в работах [1-6] схема многоканального голографического интерферометра, предназначенного для исследования сложных фазовых сред, была обобщена также на случай отражающих сред (рис. 1). Предложенная схема позволяет исследовать как отражающие, так и пропускающие среды. Как видно из рис. 1 этот интерферометр обладает несколькими выходными каналами, причем все они имеют различную чувствительность, что позволяет исследовать отражающие и пропускающие среды, имеющие сложную поверхность или сложную неоднородную среду. Первый канал – это канал низкой чувствительности, позволяющий только качественно оценить вид неоднородностей пропускающей среды или особенности поверхности отражающей среды. Оценка в обоих случаях проводится по виду искажений восстановленного регулярного объекта. Каналы два и три представляют собой голографические каналы высокой чувствительности,

которые позволяют фиксировать малейшие колебания оптических неоднородностей пропускающей среды или мельчайшие шероховатости поверхности отражающих сред. Интерференционные картины в четвертом канале подобны тем, что возникают в обычном интерферометре Тальбота. В этом канале присутствует муар, вид которого, по сути, и определяет распределение неоднородностей в пропускающей среде или вдоль поверхности отражающего объекта. Картина муара имеет достаточно низкую частоту и, поэтому данный канал менее чувствителен, чем каналы два и три.

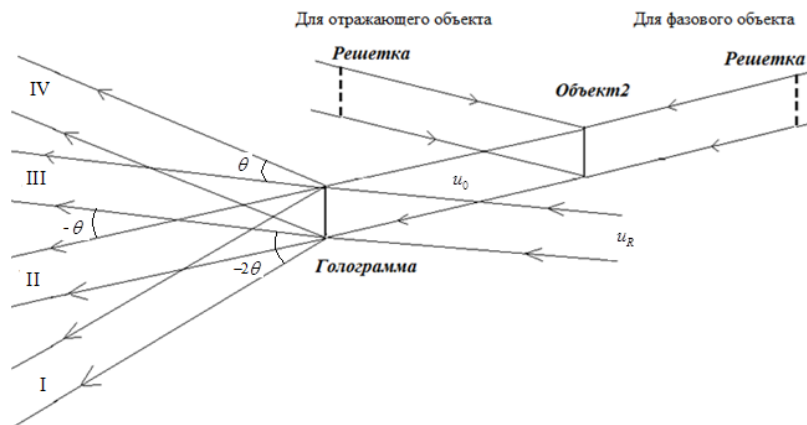


Рис. 1. Схема многоканального голографического интерферометра для исследования сложных отражающих и пропускающих сред

Важнейшей особенностью данного интерферометра является возможность изменять чувствительность каждого из каналов, что может значительно расширить диапазон исследуемых фазовых сред.

Список литературы

1. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot Interferometer // Proceedings of SPIE. 2000. V.4149. P.213-220.
2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four –channel wide-range holographic interferometer // Proceedings of SPIE. 2003. V.5144. P.606-612.
3. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. №3(39). С.56-60.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.101-103.
5. Исманов Ю.Х. Влияние длины волны на восстановленное изображение // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.104-106.
6. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. №4(50). С.194-199.

А.В. ОСИНЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Представлены результаты исследования деформирования мостовидных металлокерамических протезов, изготовленных различными способами. Регистрация деформаций осуществлялись методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии. По полученным экспериментальным данным выбран оптимальный способ изготовления протезов.

A. V. OSINTSEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

STUDY OF DIMENSIONAL STABILITY OF METAL-CERAMIC PROSTHESES BY HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

Presents results of a study of deformation of metal-ceramic bridge prostheses manufactured in a variety of ways. Registration of deformations was carried out using double-exposure holographic interferometry. According to the experimental data, an optimal method of making the prosthesis.

Использование когерентно-оптических методов позволяет успешно решать задачи исследования деформирования протезов и костных тканей в ортопедической стоматологии [1-3].

Целью работы являлось исследование деформирования металлокерамических протезов, изготовленных различными способами, а так же влияние этапов изготовления на степень деформирования в рамках одного способа изготовления. Данные исследования осуществлялись методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии [1].

В качестве объекта исследования были выбраны три варианта мостовидных протезов изготовленных по различным технологиям.

Для моделирования зубного ряда нижней челюсти использовался гипсовый слепок. С данного слепка снимались координаты центров зубов для последующего изготовления из алюминиевого сплава Д16Т модели оттиской ложки на нижнюю челюсть с установленными кульями зубов (рис. 1). Три варианта мостовидных протезов, изготовленных по разным технологиям, представлены на рис. 2.



Рис. 1. Модель оттисковой ложки с установленными культами зубов



Рис. 2. Модели мостовидных протезов

Для оценки влияния технологии изготовления мостовидных протезов на степень их деформирования, была изготовлена модель зубного ряда нижней челюсти из пластмассы холодного отверждения, причем расположение опорных зубов точно совпадало с геометрией модели оттисковой ложки нижней челюсти. Использовалась стержневая модель опорных зубов, его корневая часть представляла собой податливую консольнозашемленную балочку, на свободном конце которой имела модель культы опорного зуба, под мостовидный протез. На рис. 3 показана модель-регистратор нижних опорных зубов с установленным на них мостовидным протезом, а на рис. 4 представлена типичная картина интерференционных полос, характеризующая деформирование мостовидного протеза.



Рис. 3. Модель-регистратор с мостовидным протезом

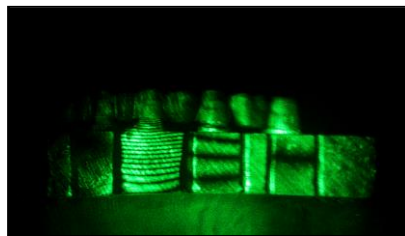


Рис. 4. Картина интерференционных полос, характеризующая деформирование протеза

Список литературы

1. Ostrovsky Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. // Holographic interferometric deformation measurement methods. М.: Nauka, 1988.
2. Larkin A.I., Osintsev A.V., et al. // Laser Physics. 2010. V.20. P.1481-1485.
3. Larkin A.I., Osintsev A.V., et al. // Computational Vision and Medical Image Processing, Thematic Conference on Computational Vision and Medical Image Processing. Olhao, Algarve, 2012. P.97-100.

Д.А. ЧЕРНЫХ, В.Т. ЧЕРНЫХ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Обсуждается голографический метод и интерферометр, созданный на его основе, для визуализации пограничного слоя около гранулы каучука, погруженной в жидкую среду.

D.A. CHERNYKH, V.T. CHERNYKH

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

HOLOGRAPHIC METHOD FOR INVESTIGATION NONSTATIONARY PROCESSES

The holographic method and the interferometer created on its basis are discussed to visualize the boundary layer near the rubber granule immersed in a liquid medium.

Изучение пограничного слоя в двухфазных средах представляет практический интерес в гидродинамике, при исследовании диффузии многокомпонентных сред, в газовой динамике и в других областях.

В работе [1] приведены оригинальные результаты по диагностике диффузионного пограничного слоя в жидкой среде. Однако, во многих задачах необходимо получать сведения о развитии пограничного слоя во времени. Для решения таких задач разработан голографический метод [2] и создан голографический интерферометр [3], экспериментально испытанный при визуализации нестационарного пограничного слоя.

Голографический метод основан на последовательной регистрации голограмм в разные моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, соответствующих разным физическим состояниям пограничного слоя. При этом в каждый фиксированный момент времени, исследуемый объект просвечивают объектными пучками $W_{об1}, W_{об2}, W_{об3}, \dots, W_{обn}$, разделенными интервалом Δt . Для последовательной записи голограмм формируют также набор опорных волновых фронтов $W_{оп1}, W_{оп2}, W_{оп3}, \dots, W_{опn}$, образующих с объектными пучками разные углы голографирования $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$. При записи голограммы в момент времени t_1 используют только $W_{оп1}$ и $W_{об1}$, а другие опорные фронты выведены из рабочего положения. По этой же методике записывают и последующие голограммы, с наперед заданными

временными интервалами. Голограммы нестационарного объекта записывают на одной регистрирующей среде в разные моменты времени.

Создан макет голографического интерферометра, оптическая система которого изображена на рис. 1.

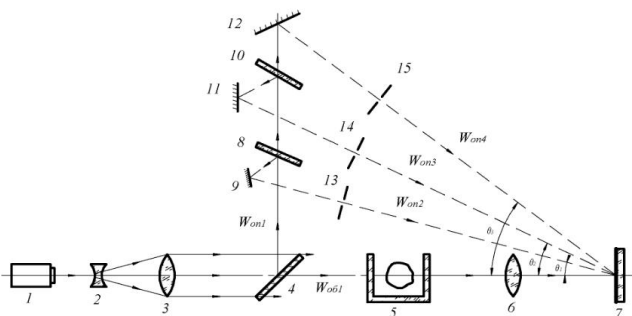


Рис. 1. Схема установки: 1 – He-Ne лазер; 2,3 – коллиматор; 4,8,10 – светоделители; 5 – кювета; 6 - объектив; 7 – регистрирующая среда; 9,11,12 – зеркала; 13 – экраны

Интерферометр имеет размер рабочего поля св. $\varnothing 50$ мм. При записи голограмм использован одномодовый He-Ne лазер тип ИЛГН - 222 с $\lambda = 632,8$ нм и мощностью излучения, равной 40 мВт. В рабочую зону интерферометра устанавливают кювету с нитробензолом и гранулой каучука. Голограммы записывают методом двух экспозиций. На стадии восстановления волновых фронтов голограмму просвечивают опорными пучками. При суперпозиции восстановленных объектных и опорных пучков образуются интерференционные картины. Интерферограммы характеризуются высоким контрастом и разрешением полос в области пограничного слоя, что подтверждает работоспособность голографического интерферометра. Анализ полос показывает как начало образования пограничного слоя, так и его развитие во времени.

Список литературы

1. Дьяконов С.Г., Сосновская Н.Б., Клинова Л.П., Черных В.Т. Исследование диффузионных пограничных слоев методом голографической интерферометрии // Доклады академии наук (хим. технология). 1982. Т.264. №4.
2. Черных В.Т., Черных Д.А., Черных Г.С. Голографический способ изучения нестационарных процессов. Патент на изобретение №2624981 от 11.07.2017. Бюл.№20, 2017.
3. Черных В.Т., Черных Д.А., Черных Г.С., Голографический интерферометр. Патент на полезную модель № 168564 от 08.02.2017. Бюл.№4, 2017.

Т.В. МИРОНОВА, А.В. КРАЙСКИЙ

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ В ГИДРОГЕЛЕ

С помощью корреляционного фонового метода получено значение коэффициента диффузии в образце гидрогеля для случая радиальной симметрии.

T. V. MIRONOVA, A. V. KRAISKI

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

DETERMINATION OF DIFFUSION COEFFICIENT IN HYDROGEL

Background Oriented Schlieren method was used to obtain diffusion coefficient of glucose in hydrogel in the experiment with radial symmetry.

Голографические сенсор – это записанная в гидрогеле толстослойная голограмма, отражающая при падении белого света только компоненту, резонансную периоду слоев [1]. При сжатии или набухании сенсора изменяется длина волны отраженного излучения, что позволяет измерять концентрацию того компонента раствора, на который «настроены» шивки гидрогелевой матрицы. Важно знать скорость проникновения тестируемого раствора в глубину гидрогеля. Для отработки методики определения коэффициента диффузии глюкозы в гидрогеле был проведен модельный эксперимент с гидрогелевой матрицей без шивок, чувствительных к глюкозе. На набухание матрицы при этом глюкоза не оказывает влияния, а скорость проникновения и распределения глюкозы оценивается по изменению показателя преломления гидрогеля с помощью корреляционного фонового метода [2].

Насыщенный водой гидрогель располагался в кювете толщиной 2.5 мм так, что контакт с раствором или дистиллированной водой осуществлялся только по цилиндрической поверхности гидрогеля. Кювета заполнялась раствором глюкозы (0.25 М/л), и эта концентрация поддерживалась снаружи образца на протяжении эксперимента. Съемка объекта для последующей обработки корреляционным фоновым методом производилась через некоторые промежутки времени в течение нескольких часов. Схема съемки показана на рис. 1а.

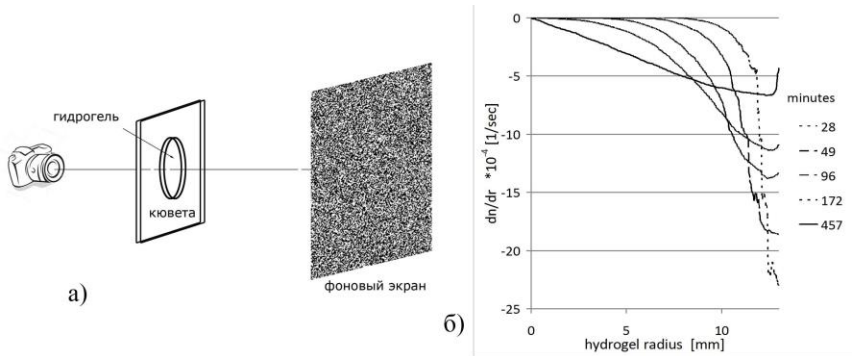


Рис. 1. Принципиальная схема съемки процесса диффузии (а); зависимость производной показателя преломления гидрогеля от радиуса для различных моментов времени с момента заливки раствора (б)

После корреляционной обработки серии полученных фотографий получены зависимости производной показателя преломления гидрогеля от радиуса для различных моментов времени. Графики для некоторых моментов времени показаны на рис. 1б.

Решение уравнения диффузии с радиальной симметрией дает зависимости производной показателя преломления от радиуса для различных моментов времени. Путем подгонки параметров был вычислен коэффициент диффузии для данной концентрации глюкозы $5.02 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$. Это практически не отличалось от полученного по методике [2] значения коэффициента взаимной диффузии раствора глюкозы и воды. Таким образом, этот гидрогель практически не оказывал влияния на скорость диффузии.

Список литературы

1. Kraiskii A.V., Postnikov V.A., Sultanov T.T., Khamidulin A.V. Holographic sensors for diagnostics of solution components // Quantum Electronics. 2010. V.40 (2). P.178-182.
2. Kraiskii A.V., Mironova T.V. Comparison of the results of refractometric measurements in the process of diffusion, obtained by means of the background-oriented schlieren method and the holographic interferometry method // Quantum Electronics. 2015. V.45 (8). V.759-764.

Д.М. КЛЫЧКОВА^{1,2}

¹*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СПЕКТР СИГНАЛА
КОГЕРЕНТНОСТИ ПРИ ДЕФОКУСИРОВКЕ ОБЪЕКТА
В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ
НА ПРОПУСКАНИЕ С КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИМ
ЧАСТИЧНО ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНЫМ
ОСВЕЩЕНИЕМ**

Проведено экспериментальное исследование пространственного спектра сигнала когерентности при дефокусировке объекта в цифровой голографической микроскопии на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно-когерентным освещением и сравнение результатов эксперимента с теорией.

D.M. KLYCHKOVA^{1,2}

¹*Saratov National Research State University*

²*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

**SPATIAL SPECTRUM OF COHERENCE SIGNAL AT OBJECT
DEFOCUSING IN DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY
IN TRANSMISSION WITH QUASIMONOCROMATIC
PARTIALLY SPATIALLY COHERENT ILLUMINATION**

Experimental investigation of coherence signal spatial spectrum at object defocusing in digital holographic microscopy in transmission with quasimonochromatic partially spatially coherent illumination and comparison of the experimental results with the theory has been done.

Использование частично пространственно-когерентного (ЧПК) освещения в цифровой голографической микроскопии (ЦГМ) позволяет снизить когерентные шумы в восстанавливаемом с голограммы изображении объекта [1]. Однако теоретически было показано [2], что при визуализации расфокусированных объектов в ЦГМ на пропускание ЧПК освещение должно приводить к уменьшению модуля пространственного спектра сигнала когерентности на высоких поперечных пространственных частотах, что может вызвать снижение поперечного пространственного разрешения численно сфокусированных изображений.

Целью работы являлось экспериментальное исследование пространственного спектра сигнала когерентности при дефокусировке объекта в ЦГМ на пропускание с ЧПК освещением и сравнения результатов эксперимента с теорией. Экспериментальное исследование состояло из записи голограмм объекта при помощи ЦГМ (схема аналогична схеме в [3]) при различных величинах дефокусировки Δz и числовой апертуры освещения NA_i и вычисления зависимости: $\alpha^{эксн}(k_r) = |\tilde{\Gamma}(\Delta z; \omega; k_r)| / |\tilde{\Gamma}(\Delta z = 0; \omega; k_r)|$, где k_r – поперечная пространственная частота пространственного спектра сигнала когерентности $\tilde{\Gamma}(\Delta z; \omega; k_r)$, ω – круговая временная частота, Δz – величина дефокусировки. Для сравнения результатов эксперимента с теорией было выполнено численное моделирование зависимости $\alpha^{теор}(k_r)$ на основании теории, представленной в работе [2]. Из рис. 1 следует, что в ЦГМ на пропускание при использовании ЧПК освещения ($NA_i > 0$) наблюдается эффект уменьшения модуля пространственного спектра сигнала когерентности на высоких поперечных пространственных частотах k_r при дефокусировке объекта. Данный эффект усиливается с возрастанием величины числовой апертуры освещения NA_i . Сравнение экспериментальных зависимостей $\alpha^{эксн}$ с теоретическими $\alpha^{теор}$ показывает высокую степень сходства, что является подтверждением теоретических выводов, изложенных в работе [2].

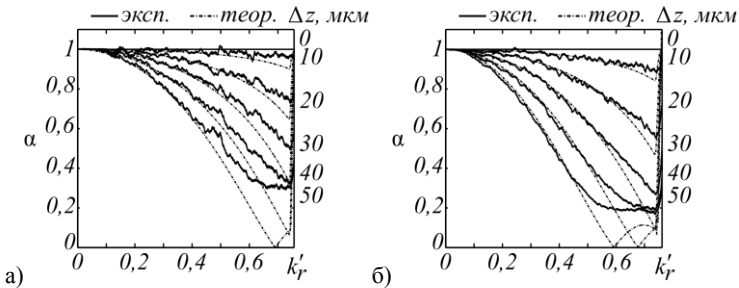


Рис. 1. Зависимость $\alpha^{эксн}$ и $\alpha^{теор}$ от нормированной поперечной пространственной частоты k_r при различных Δz : $NA_i \approx 0,008$ (а), $NA_i \approx 0,012$ (б)

Список литературы

1. Dubois F., et. al. // Applied Optics. 2004. V.43. P.1131-1139.
2. Гребенюк А.А. Формирование сигнала и свойства визуализации в интерференционной микроскопии: дис. на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Саратов, 2014.
3. Grebenyuk A.A., Taranchikova Y.V., Ryabukho V.P. // Journal of Optics. 2014. V.16. P.105301.

В.В. ДУДЕНКОВА¹, Ю.Н. ЗАХАРОВ^{1,2}

¹*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

²*Гарвардский университет, Кембридж, США*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ЛОКАЛИЗАЦИОННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МИКРОСКОПИИ BaLM В ЛАЗЕРНОМ СКАНИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Для достижения сверхвысокого разрешения при исследовании микрообъектов впервые использован анализа мерцания флуоресценции методом локализационной флуоресцентной микроскопии BaLM в лазерном сканирующем режиме сбора данных.

V.V. DUDENKOVA¹, Yu.N. ZAKHAROV^{1,2}

¹*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

²*Harvard University, Cambridge, USA*

INVESTIGATION OF FLUORESCENT BIOLOGICAL OBJECTS BY METHOD OF LOCALIZATION FLUORESCENT MICROSCOPY BaLM IN LASER SCANNING MODE

To achieve an ultrahigh resolution with micro-objects, fluorescence flicker analysis was used for the first time by the method of localization fluorescence microscopy BaLM (bleaching/blinking assisted localization microscopy) in the laser scanning mode of data collection.

Традиционная оптическая флуоресцентная микроскопия имеет ограничение пространственного разрешения дифракционным пределом Аббе. Последние десятилетия бурно развиваются специализированные методики повышения разрешения, которые можно разделить на три большие группы: микроскопия структурированного освещения, микроскопия на основе истощения флуоресценции вынужденным излучением и локализационная микроскопия одиночных молекул. Для данной работы был выбран самый универсальный метод локализационной микроскопии BaLM [1], не требующий специализированного оборудования.

Общий принцип локализационной микроскопии одиночных молекул ВаLM заключается в возбуждении флуоресценции, регистрации и анализе мерцания флуорофоров. На данный момент этот принцип был использован только для широкопольного режима возбуждения и сбора флуоресценции. В работе предложен способ применения ВаLM метода к распространённому в современной микроскопии лазерному сканирующему режиму микроскопии.

Лазерный сканирующий режим регистрации флуоресцентных ВаLM данных произведен с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 (Carl Zeiss, Германия). Исследовалась структура микротрубочек отростков нейрона с помощью антител, маркированных флуорофором Alexa Fluor 647, прикрепленных к MAP2. Флуоресценция возбуждалась с помощью He-Ne лазера с длиной волны 633 нм с мощностью возбуждения 0,43 мВт. Изображения построены попиксельно с временем сканирования пиксела 0,32 мкс и с использованием водно-иммерсионного объектива C-Apochromat (Carl Zeiss, Германия) с увеличением 63x и числовой апертурой равной 1.2. Поле зрения составило 25x25 мкм, на один пиксел приходится порядка 24 нм в плоскости образца. Применение для анализа полученных данных алгоритма сверхвысокого разрешения на основе оптических флуктуаций и статистическом анализе временных флуктуаций сигнала, вызванных миганием флуорофоров SOFI (Super-resolution optical fluctuation microscopy) [2] 8-го порядка, предоставило возможность получения продольного разрешения вплоть до 87 нм, что в 3.03 раза превосходит дифракционный предел.

Список литературы

1. Burnette D.T., Sengupta P., Dai Y., Lippincott-Schwartz J., Kachar B. // PNAS. 2011. V.108, №52. P.21081
2. Dertinger T., Colyer R., Iyer G., Weiss S., Enderlein J. Fast, background-free, 3D super-resolution optical fluctuation imaging (SOFI) // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. V.106. N.52. P.22287.

А.А. ЧИПЕГИН, Н.В. ПЕТРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ МИКРОЗЕРКАЛ В ЦИФРОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

В данной работе рассматриваются особенности использования матрицы микрозеркал для управления волнового фронта лазерного излучения.

A.A. CHIPEGIN, N.V. PETROV
ITMO University, Saint-Petersburg

FEATURES OF THE WAVEFRONT SHAPING TECHNIQUE USING DIGITAL MICROMIRROR DEVICE IN DIGITAL INTERFEROMETRIC DIAGNOSTICS

In this work we consider the features of the wavefront shaping technique using digital micromirror device in digital interferometric diagnostics.

Контроль волнового фронта в цифровой интерферометрической диагностике является актуальной задачей [1]. С появлением доступных пространственных модуляторов света (SLM) стало возможным фокусировать лазерное излучение в рассеивающих средах [2], корректировать аберрации в различных оптических системах [3], волновой фронт излучения [4]. В качестве SLM широкую популярность обретают устройства с массивом микрозеркал (DMD). DMD имеет ряд преимуществ перед LC SLM: скорость переключения свыше 1кГц, высокое пространственное разрешение. Каждый пиксель DMD может поворачивается относительно плоскости экрана на $\pm 12^\circ$ (рис. 1).

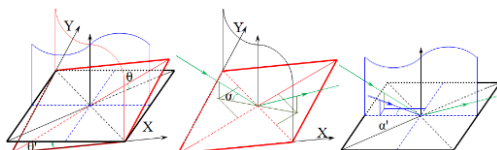


Рис. 1. Микрозеркало во включенном состоянии (верхняя плоскость на рисунке слева) составляет угол θ с плоскостью DMD (черная плоскость на рисунке слева), поворот микрозеркала осуществляется относительно его диагонали

При включенном состоянии всех пикселей DMD представляет собой Эшелетт. При повороте относительно диагонали на угол θ , угол поворота относительно оси X - $\theta' = \arctan(\tan(\theta)/\sqrt{2})$. При произвольном угле падения α на микрозеркало, угол падения относительно оси X - $\alpha' = \arctan(\tan(\alpha)/\sqrt{2})$. Уравнение дифракционной решетки в таком случае будет иметь вид: $m = 2d/\lambda (\sin(\alpha') + \sin(\beta'))$, где β' - угол дифракции. При целочисленных значениях m выполняется условие “блеска” [5], при котором можно получить максимум энергии в дифракционном порядке. При m кратных 0.5 – получается минимум энергии в дифракционном порядке. Условие блеска выполняется при $\mu = 1$. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования распределения значения μ в зависимости от угла падения α при заданных значениях размера микрозеркала $d = 7.56$ мкм, для $\lambda_1 = 635$ нм и $\lambda_2 = 532$ нм. Видно, что для λ_1 можно получить максимальное количество энергии в одном центральном дифракционном порядке в диапазоне углов падения от -10° до 30° , в то время как для λ_2 диапазоны углов значительно меньше. Общая дифракционная эффективность зависит также от коэффициента отражения микрозеркал, коэффициента пропускания защитной плёнки DMD и для DLP6500 FVE не превышает 73 %. Знания зависимости условия “блеска” от угла падения необходимы для построения экспериментальных установок в цифровой интерферометрической диагностике [6].

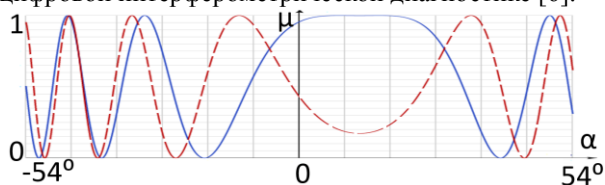


Рис. 2. Критерий “блеска” для DLP6500 при $\lambda_1 = 635$ нм (сплошная), $\lambda_2 = 532$ нм (пунктир)

Работа выполнена в рамках научного проекта №3.1893.2017/4.6, выполняемого научными коллективами научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Molodtsov D. Yu., Cheremkhin P. A., Krasnov V. V., et al. // Proc. SPIE. V.0889. P.988926.
2. Vellekoop I. M., Mosk A. P. // Optics Letters. 2007. V.32 (16). P.2309-2311.
3. Bowman R. W., et al. // J. Opt. 2010. V.12. P.1-6.
4. Love G. D. // Appl. Opt. 1997. V.36. P.1517.
5. Stamm R. F., Whale N. J. // JOSA. 1946. V.36. P.2.
6. Chen X., Yan B., et al. // Appl. Opt. 2012. V.51(30). P.7214-20.

М.С. КОВАЛЕВ, С.Б. ОДИНОКОВ, П.А. РУЧКА

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ С УЧЕТОМ МЕТОДОВ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Проведены исследования влияния погрешностей формирования структур голограммных элементов на результаты восстановления голограмм. Предложены методы алгоритмического учета особенностей формирования микрорельефа при прямой лазерной записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье (КСГФ) для улучшения их эффективности.

M.S. KOVALEV, S.B. ODINOKOV, P.A. RUCHKA

Bauman Moscow State Technical University

DIGITAL SYNTHESIS OF FOURIER HOLOGRAMS WITH CONSIDERATION OF THE METHODS OF THEIR REALIZATION

The influence of errors in the formation of hologram element structures on the results of hologram reconstruction was investigated. Methods for algorithmically taking into account the peculiarities of microrelief formation in the direct laser recording of computer-generated Fourier holograms (CGFH) for improving their efficiency are proposed.

Методы прямой лазерной записи и электронно-лучевой литографии широко используются в настоящее время для высокоточной записи компьютерно-синтезированных голограммных оптических элементов (ГОЭ) [1, 2]. Однако из-за особенностей цифрового синтеза ГОЭ, а также из-за физических характеристик лазерного пучка, в т.ч. вида его сечения, при записи цифровых голограмм на подложки возникают ошибки, например, скругления краев и флуктуации траектории при записи непрерывных структур [3, 4]. Эти ошибки приводят к появлению нежелательных шумов при восстановлении голограмм, таким образом, задача взаимного учета особенностей прямой лазерной записи и цифрового синтеза голограммных элементов является весьма актуальной.

Как правило, для уменьшения ошибок при записи голограмм и увеличения отношения сигнал/шум при восстановлении, прибегают к использованию более точных лазерных литографов с меньшим диаметром лазерного пучка, а также других способов, не изменяющих исходный

минимальный элемент КСГФ [5, 6]. Однако такое решение приводит к удорожанию производства голограмм и не ведет к полному исключению описанных ошибок. Целью работы является разработка компьютерного алгоритма создания ГОЭ, учитывающего физические параметры лазерного пучка литографа и создающего голограммы с минимальным элементом, соответствующим этим параметрам. Разработка алгоритма проводилась в среде Matlab с использованием уже известных схем синтеза цифровых полутонных голограмм Фурье.

В работе рассмотрены наиболее подходящие для компьютерного моделирования схемы учета несоответствия стандартного минимального элемента цифровой голограммы и вида сечения пучка лазера, проведен сравнительный анализ потенциальных погрешностей при записи голограмм и представлена численная реализация наиболее удачного алгоритма.

Переход к цифровому синтезу голограммных и дифракционных элементов с «непрямоугольным» минимальным элементом позволил добиться практически полного исключения ошибок при записи полутонных и бинарных оптических элементов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение №14.577.21.0258 от 26 сентября 2017 года (идентификатор проекта RFMEFI57717X0258).

Список литературы

1. Kovalev M.S., Krasin G.K., Malinina P.I., Odinkov S.B., Sagatelyan H.R. Wave front sensor based on holographic optical elements // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012064.
2. Бегин А.Ю., Ковалев М.С., Красин Г.К., Одинокоев С.Б., Ручка П.А., Сцепуро Н.Г. Полутонные защитные печатные элементы для маркировки продукции // Фотоника. 2017. Т.5. С.74-78.
3. Poleshuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. V.38. P.1295.
4. Полешук А.Г., Коронкевич В.П., Корольков В.П. и др. // Автометрия. 1997. №6. С.42.
5. Im Y., Moon W., Roh J., et al. Direct laser writing of computer-generated hologram using pulse laser system // Imag. and App. Opt. 2014.
6. Waegaard K.J., Hansen H.D., Balling P. // Appl. Phys. 2013. V.113. P.345-349.

М.С. КОВАЛЕВ, С.Б. ОДИНОКОВ, Н.Г. СЦЕПУРО

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ГОЛОГРАММЫ ФРЕНЕЛЯ: МЕТОДЫ СИНТЕЗА И ПРИМЕНЕНИЯ

Приведены результаты численного моделирования компьютерно-синтезированных голограмм Френеля и экспериментов по переносу голограмм Френеля на не фоточувствительные рассеивающие среды с использованием внешних периферийных устройств для ЭВМ. Проведен качественный анализ восстановленных цифровых голограмм путем вычисления SMSE и SSIM.

M.S. KOVALEV, S.B. ODINOKOV, N.G. STSEPURO

Bauman Moscow State Technical University

FRENEL HOLOGRAMS: SYNTHESIS AND APPLICATION METHODS

We are presenting the results of numerical simulation of computer-generated Fresnel holograms and experiments of Fresnel holograms transfer to non-photosensitive scattering carrier using peripheral computer devices. A qualitative analysis of the reconstructed digital holograms was carried out by calculating SMSE and SSIM.

Развитие компьютерных технологий и современнее расчетные мощности сделали логичным бурное развитие компьютерного синтеза голограмм различных типов [1, 2]. В основу компьютерных моделей расчета голограмм Френеля или компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) Фурье легли методы, основанные на классической аналоговой голографии и дифракционных явлениях световых пучков.

Целью работы является экспериментальное исследование пространственных характеристик КСГ Френеля на нефоточувствительных рассеивающих средах (НФРС) (бумага, пленка, пластик, стекло и т.д.), сформированных при помощи внешних периферийных устройств, с использованием технологий термотрансферной печати и методов прямой лазерной записи [3], для создания полиграфических защитных элементов (ПЗЭ), а также анализ различных методов расчета и синтеза голограмм на основе дифракции Френеля с учетом пространственных характеристик рассеивающих сред.

В алгоритм синтеза ПЗЭ на основе КСГ Френеля необходимо внести характеристические параметры рассеивающей среды для повышения

качества восстановления голограмм. При синтезе голограмм, в основе которых дифракционный интеграл Френеля, ядро интеграла преобразуют при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данная замена позволяет упростить алгоритм синтеза и повысить скорость вычисления, однако, упрощение такого рода ведет за собой дополнительную ошибку при аппроксимации и дискретизации интеграла Френеля [4].

Пространственные характеристики КСГ Френеля на НФРС (рис. 1), такие как: плотность печати/записи, минимальный размер элемента голограммы, толщина/глубина слоя и т.д. – напрямую влияют на результат восстановления голограмм (рис. 2), что в свою очередь накладывает физические ограничения на объекты шифрования при синтезе ПЗЭ. В ходе работы был произведен анализ методов расчета КСГ Френеля, и внесены поправки в методику расчета для повышения качества восстановления цифровых голограмм.

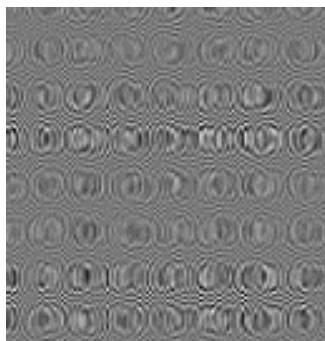


Рис. 1. Компьютерно-синтезированная голограмма Френеля



Рис. 2. Результат восстановления КСГ Френеля

Список литературы

1. Kovalev M.S., Krasin G.K., Malinina P.I., Odinokov S.B., Sagatelyan H.R. Wave front sensor based on holographic optical elements // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012064.
2. Бегин А.Ю., Ковалев М.С., Красин Г.К., Одинокоев С.Б., Ручка П.А., Сцепуро Н.Г. Полутонные защитные печатные элементы для маркировки продукции // Фотоника. 2017. Т.5. С.74-78.
3. Poleshuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. V.38. P.1295.
4. Tsang P.W.M., Chow Y.-T., Poon T.-C. Generation of phase-only Fresnel hologram based on down-sampling // Opt. Exp. 2014. V.22. Is.21. P.25208-25214.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ,
К.М. ЖУМАЛИЕВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,
Кыргызская Республика*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ПРИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ

Проведено теоретическое исследование процесса записи голограмм на фототермопластических средах, в которых предполагается линейная зависимость между изменением показателя преломления и температурным расширением среды. Результаты исследования позволяют оценить требуемую мощность лазерного излучения для записи информации как функции пространственной частоты и продолжительности облучения.

N.K. DZHAMANKYZOV, Y.K. ISMANOV,
K.M. ZHUMALIEV, S.A. ALYMKULOV

*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of NAS KR,
Bishkek, Kyrgyz Republic*

THE TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION IN PHOTOTHERMOPLASTIC MEDIA DURING OF HOLOGRAM RECORDING

A theoretical study of the recording of holograms on photothermoplastic media in which a linear relationship between the change in the refractive index and the temperature expansion of the medium is assumed. The results of the study allow us to estimate the required laser radiation power for the information recording as the function of the spatial frequency and the radiation exposure duration.

Существует класс материалов, в которых их оптические и спектроскопические свойства при облучении изменяются в зависимости от плотности падающей энергии, и процесс сопровождается образованием модулированного теплового поля, которое приводит к изменению оптических характеристик среды. Механизм изменения оптических параметров, ответственных за изменение диэлектрической проницаемости вещества за счет действия модулированного теплового поля, может быть различным [1, 2]. Один из них связан с расширением среды под действием тепла и, соответственно, изменением ее плотности. Изменение плотности

среды приводит к изменению ее показателя преломления, который может быть использован для модуляции внешнего светового пучка. В зависимости от того, изменяется ли мнимая, реальная или обе части диэлектрической проницаемости вещества, формируется амплитудная, фазовая или амплитудно-фазовая решетка.

Пусть две плоские когерентные волны с длиной волны λ падают на такой записывающий слой под углами $\pm \frac{\theta}{2}$ к нормали к поверхности.

Из-за эффекта интерференции плотность падающей энергии периодически изменяется вдоль оси y . В результате поглощения света в слое соответствующее температурное поле индуцируется в виде некоторой тепловой решетки [3, 4]. Когда достигается определенная амплитуда температурного поля, периодическая структура излучения регистрируется посредством соответствующего изменения оптических параметров, то есть показателя преломления материала слоя. Таким образом, под воздействием излучения изменяются свойства материала. Теоретический анализ показал, что распределение температурных полей вдоль поверхности фототермопластического носителя в этом случае описывается следующим соотношением:

$$T(y, t) - T_0 = \Delta T(y, t) = 2 \frac{I_0 A \sqrt{at}}{\eta} [1 + M(k, t) \cos(ky)],$$

где I_0 - интенсивность света на входе в среду, T_0 - температура окружающей среды, k - волновое число, A - коэффициент поглощения среды, a и η - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности среды соответственно, $M(k, t)$ - коэффициент модуляции световых пучков при интерференции, t - время облучения фототермопластической среды.

Список литературы

1. Джаманкызов Н.К. Оценка параметров фототермической записи в различных средах // Наука, новые технологии и инновации. 2009. № 10. С.3-8.
2. Джаманкызов Н.К., Жумалиев К.М. О скоростной записи голограмм на фототермопластических носителях // IV Международной конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.204.
3. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. №3(39). С.56-60.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.101-103.

А.И. ЛИВАШВИЛИ, В.В. КРИШТОП, Г.В. КОСТИНА,
П.В. ВИНОГРАДОВА, Н.М. КИРЕЕВА

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ДИНАМИКА ВОЛН ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В НАНОЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В СВЕТОВОМ ПОЛЕ

Показано, что в условиях стационарной температуры и концентрационной зависимости коэффициента теплопроводности среда становится бистабильной. Изучается влияние одномерной конвекции.

A.I. LIVASHVILI, V.V. KRISHTOP, G.V. KOSTINA,
P.V. VINOGRADOVA, N.M. KIREEVA

Far Eastern State Transport University. Khabarovsk

DYNAMICS OF SWITCHING WAVES IN A NANOFUID IN A LIGHT FIELD

It is shown that under the conditions of a stationary temperature and the concentration dependence of the thermal conductivity coefficient, the medium becomes bistable. The influence of one-dimensional convection is studied.

В данной работе рассматривается жидкофазная среда с микрочастицами [1], облучаемая световым пучком с равномерно распределенной интенсивностью \bar{I}_0 . Процессы тепломассопереноса в этом случае описываются системой балансных уравнений для температуры и частиц с учётом конвекции. В дальнейшем будем рассматривать процессы на фоне стационарной температуры: $\partial T / \partial t = 0$. Концентрационную зависимость коэффициента теплопроводности можно представить в виде [2]:

$$\lambda(C) = \lambda_0 + \beta C = \lambda_0 (1 + pC), \quad (1)$$

где $p = \beta / \lambda_0 > 1$. В дальнейшем, переходя к безразмерным переменным в диффузионном уравнении, получим:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = b \frac{\partial^2 C}{\partial \rho^2} - \text{Pe}b \frac{\partial C}{\partial \rho} - C(1-C)(1-pC), \quad (2)$$

где $b = \frac{\lambda_0}{S_T \alpha I_0 x_0^2}$, $\tau = \frac{D_T \alpha I_0}{\lambda_0} t$, $\rho = \frac{x}{x_0}$, Pe – постоянная Пекле,

S_T - коэффициент термодиффузии.

Нули функции источника в этом уравнении $F(C)$: $C_1=0$, $C_2=1/p$, $C_3=1$, соответствуют стационарным пространственно однородным состояниям. При этом, состояния $C=C_{1,3}$ – устойчивые (в них $F'(C)<0$), а состояние $C=C_2$ - неустойчивое. Таким образом, изучаемая среда является бистабильной. С помощью подстановки Коула-Хопфа можно получить точное решение:

$$C(\rho, \tau) = \sqrt{\frac{b}{p}} \frac{M_1 k_i \exp(k_i \rho + \eta_i \tau) + M_2 k_j \exp(k_j \rho + \eta_j \tau)}{1 + M_1 \exp(k_i \rho + \eta_i \tau) + M_2 \exp(k_j \rho + \eta_j \tau)}. \quad (3)$$

Таким образом, возникает двухволновое решение. Эти концентрационные волны обеспечивают эффекты переключения между состояниями системы. Анализ решения с учётом значений параметров k и η показывает, что в среде распространяются четыре однонаправленные не взаимодействующие между собой волны, скорости которых зависят от числа Пекле.

Некоторые итоги:

1) существование концентрационной зависимости коэффициента теплопроводности приводит к формированию в наножидкости, находящейся в световом поле, диссипативной бистабильной среды;

2) учет конвекции даже в одномерном приближении и с постоянной скоростью показывает её существенное влияние на происходящие процессы.

Список литературы

1. Livashvili A.I., Krishtop V.V., Karpets Y.M., Kireeva N.M. Formation of bistable medium state in nanofluids under the influence of laser radiation // Proceedings of SPIE. 2016. V.10176.
2. Рудяк В.Ю., Белкин А.А // Письма в журнал технич. физики. 2010. Т.36. С.660-662.

Н.В. СИДОРОВ, В.С. ГОРЕЛИК^{1,2}

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

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

ПРЕРЫВИСТАЯ ТРАЕКТОРИЯ СФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ ДВУХ ФОТОНОВ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Обнаружена прерывистая траектория сфокусированного лазерного луча, распространяющегося вдоль полярной оси стехиометрического кристалла ниобата лития, не являющегося гиротропным кристаллом. Показано, что такой эффект может быть обусловлен формированием связанных состояний двух фотонов в результате различных нелинейно-оптических процессов: двухфотонного поглощения, вынужденного комбинационного рассеяния и др.

N. V. SIDOROV, V. S. GORELIK^{1,2}

*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

²*Bauman Moscow State Technical University*

INTERMITTENT BEAM TRACK OF THE FOCUSED LASER BEAM AND LASER EXCITEMENT OF THE COUPLED CONNECTED STATES OF TWO PHOTONS IN DIELECTRIC CRYSTALS

We have detected intermittent beam track of the focused laser beam propagating along the polar axis of stoichiometric lithium niobate crystal which is not a gyrotropic crystal. Such effect can be caused by excitation of coupled states of two photons as a result of different optically nonlinear processes: two-photon absorption, stimulated Raman scattering.

В гиротропных кристаллах наблюдается эффект вращения плоскости поляризации при распространении поляризованного лазерного луча в определённых кристаллографических направлениях. При этом наблюдается прерывистая траектория лазерного луча. Такой эффект был объяснён тем, что для некоторых областей кристалла направление

поляризации излучения, оказывалось совпадающим с направлением наблюдения [1]. Нами обнаружена прерывистая траектория лазерного луча, распространяющегося вдоль полярной оси в стехиометрическом нелинейно-оптическом кристалле ниобата лития (LiNbO_3), не являющимся гиротропным, рис. 1а. Период модуляции составляет 0,33 мм. Причем прерывистая структура луча наблюдается в основном в области фокальной перетяжки и только для стехиометрического кристалла. Для кристаллов LiNbO_3 других составов этот эффект нами не обнаружен. Нами также исследована траектория поляризованного лазерного луча в гиротропном кристалле иодата лития (LiIO_3), рис. 1б. Видно, что траектория состоит из хорошо разделённых круглых пятен. При этом обнаруживается дополнительная модуляция интенсивности с существенно большим значением периода.

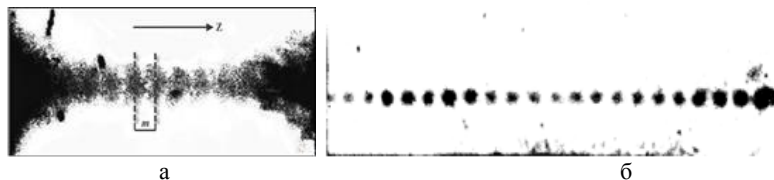


Рис. 1. Прерывистые структуры сфокусированного лазерного луча ($\lambda = 514,5$ нм, величина периода $m \approx 0,33$ мм) в стехиометрическом монокристалле LiNbO_3 вдоль полярной оси (а) и в монокристалле LiIO_3 вдоль оптической оси (б)

При распространении интенсивного лазерного излучения в диэлектрических кристаллах могут происходить спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние света (ВКР), двухфотонно-возбуждаемая фотолюминесценция, удвоение частоты лазерного излучения и др. При этом большая интенсивность лазерного излучения в области фокальной перетяжки может приводить к формированию связанных состояний двух фотонов (баундтонов), движущихся по кристаллу и распадающихся на два фотона [2]. Эффект прерывистой структуры лазерного луча в кристаллах, не являющихся гиротропными, может быть обусловлен формированием связанных состояний двух фотонов в результате различных нелинейно-оптических процессов: двухфотонного поглощения, ВКР и др.

Список литературы

1. Воронцова Е.Ю., Гречишкин Р.М., Каплунов И.А., Колесников А.И., Молчанов В.Я., Тальзин И.В., Третьяков С.А. Проявление гиротропии при рассеянии света в кристаллах парателлурита // Оптика и спектроскопия. 2008. Т.104. С.976-979.
2. Горелик В.С. Оптика глобулярных фотонных кристаллов // Квантовая электроника. 2007. Т.37. С.409-432.

К.Н. МИНЬКОВ^{1,2}, Д.Д. РУЖИЦКАЯ^{1,3}, А.А. САМОЙЛЕНКО¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва*

²*Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СПОНТАННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА

Приведены результаты моделирования процесса спонтанного параметрического рассеяния (СПР) для формирования бифотонов в заданном диапазоне длин волн. Разобраны параметры, влияющие на генерируемые фотоны.

K.N. MINKOV^{1,2}, D.D. RUZHITSKAYA^{1,3}, A.A. SAMOYLENKO¹

¹*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

³*Lomonosov Moscow State University*

CALCULATION OF PARAMETERS OF SPONTANEOUS PARAMETRIC DOWN-CONVERSION FOR SELECTION OF NONLINEAR CRYSTAL CHARACTERISTICS

The results of modeling the process of spontaneous parametric down-conversion (SPD) for the formation of biphotons in a given wavelength range are presented. Parameters affecting the generated photons are disassembled.

В современном мире постоянно повышаются требования к безопасности при передаче информации. В связи с этим, все большее распространение получают системы на основе единичного фотонного излучения, особенно в криптографических системах. Для правильной и безперебойной работы таких систем необходимо их метрологически обеспечить. Одним из перспективных способов калибровки подобных приборов описан в [1]. Он заключается в одновременной регистрации пары коррелированных фотонов, полученных с помощью эффекта спонтанного параметрического рассеяния (СПР) в нелинейном кристалле.. Для реализации метода калибровки однофотонных детекторов в широком диапазоне длин волн, необходим перестраиваемый источник коррелированных фотонов.

Целью работы является моделирование процесса СПР в нелинейном кристалле, с целью определения требуемых параметров нелинейного кристалла, которые позволят получить фотоны с длинами волн в нужном диапазоне. Процесс возникновения фотонов показан на рис. 1.

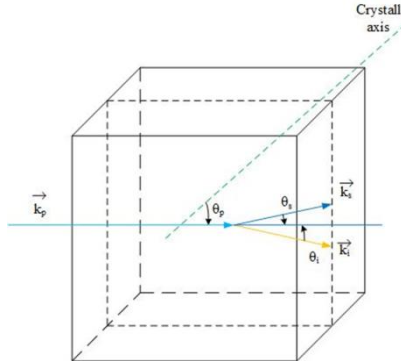


Рис. 1. Рождение бифотонов в нелинейном кристалле:

k_p , k_s , k_i – волновые вектора фотонов накачки, сигнальной, холостой волны соответственно, θ_p – угол, между оптической осью кристалла и волной накачки, θ_s , θ_i углы наблюдения сигнальной и холостой волн

Луч накачки (k_p) попадает в нелинейную среду (в нашем случае рассматривается кристалл ВВО) в которой фотоны накачки с некоторой вероятностью распадаются на пары фотонов: сигнальный (k_s) и холостой (k_i). Образованные таким образом фотоны связаны условием фазового синхронизма [3]:

$$\begin{aligned} h\nu_p &= h\nu_s + h\nu_i \rightarrow \nu_p = \nu_s + \nu_i \\ \hbar\vec{k}_p &= \hbar\vec{k}_s + \hbar\vec{k}_i \rightarrow \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \end{aligned} \quad (1)$$

Решение системы (1) позволило определить длины волн, на которых будут генерироваться бифотоны, а также подобрать такой нелинейный кристалл, при установке которого будет перекрываться спектр длин волн от 0,60 до 1,55 мкм.

Список литературы

1. Клышко Д.Н., Пенин А.Н. Перспективы квантовой фотометрии // Успехи физических наук. 1987. Т.152. В.4.
2. Boeuf N., Branning D., Chaperot I., Dauler E., Guerin S., Jaeger G., Muller A., Migdal A. Calculating characteristics of noncollinear phase // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers matching in uniaxial and biaxial crystals. 2000. V.39. P.1016-1024.

М.Н. ЛИТВИНОВА, В.А. ПОГОДИНА, А.В. СЮЙ,
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, Мурманская обл.*

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ LiNbO₃

В работе исследованы электрооптические свойства кристаллов ниобата лития LiNbO₃, легированных цинком [Zn] = 0.02 – 0.88 вес.%, магнием [Mg] = 0.25 – 0.5 вес.% и бором [B] = 0.08 – 0.12 вес.%. Получены зависимости интенсивности прошедшего через кристалл излучения от приложенного напряжения.

M.N. LITVINOVA, V.A. POGODINA, A.V. SYUY,
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 the Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

ELECTROOPTICAL PROPERTIES OF DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

The electrooptical properties of lithium niobate crystals (LiNbO₃) doped by zinc [Zn] = 0.02 – 0.88 wt%, magnesium [Mg] = 0.25 – 0.5 вес.% and boron [B] = 0.08 – 0.12 вес.% have been investigated. The dependences of the transmitted radiation intensity on the applied voltage were obtained for the doped lithium niobate crystals.

В работе [1] установлена структурная обусловленность пороговых концентраций допирующего элемента в кристаллах ниобата лития (LiNbO₃:Zn, [Zn] > 3 моль %). При определенных концентрациях примесей происходит повышение степени структурного упорядочения катионной подрешетки кристаллов вдоль полярной оси и уменьшение их фоторефрактивной чувствительности.

В данной работе исследовались электрооптические свойства легированных кристаллов LiNbO₃:Zn с содержанием цинка [Zn] = 0.02; 0.03; 0.52; 0.62; 0.88 вес.%; кристаллы LiNbO₃:Mg с содержанием магния [Mg] = 0.25; 0.5 вес.% и кристаллы LiNbO₃:B с содержанием бора [B] = 0.08; 0.12 вес.%. Монокристаллы конгруэнтного состава (легированные цинком, магнием и бором), имели форму

параллелепипедов с ребрами, параллельными кристаллофизическим осям x , y , z соответственно. При исследовании электрооптических свойств, измерялась интенсивность света, прошедшего через ячейку Поккейса с кристаллом (излучение распространяется вдоль полярной оси кристалла).

Установлено, что зависимость электрооптических свойств кристаллов ниобата лития $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$, $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ от содержания примеси в кристалле имеет немонотонный характер. Для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($[\text{Zn}] = 0.02; 0.03; 0.52; 0.62$ вес.%), а также для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ ($[\text{Mg}] = 0.25; 0.5$ вес.%) и $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ ($[\text{B}] = 0.08; 0.12$ вес.%) зависимости прошедшего излучения от приложенного напряжения для прямого и обратного поля несимметричны (рис. 1а и б).

Для кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($[\text{Zn}] = 0.03; 0.52; 0.62$ вес.%), $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ ($[\text{Mg}] = 0.25$ вес.%) и $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ ($[\text{B}] = 0.12$ вес.%) наблюдается значительное снижение электрооптического эффекта. Причем в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($[\text{Zn}] = 0.03$ вес.%) релаксация внутреннего поля происходит значительно медленнее, чем в других исследованных кристаллах, что вероятно обусловлено наличием в кристалле медленно релаксирующих внутренних полей [2].

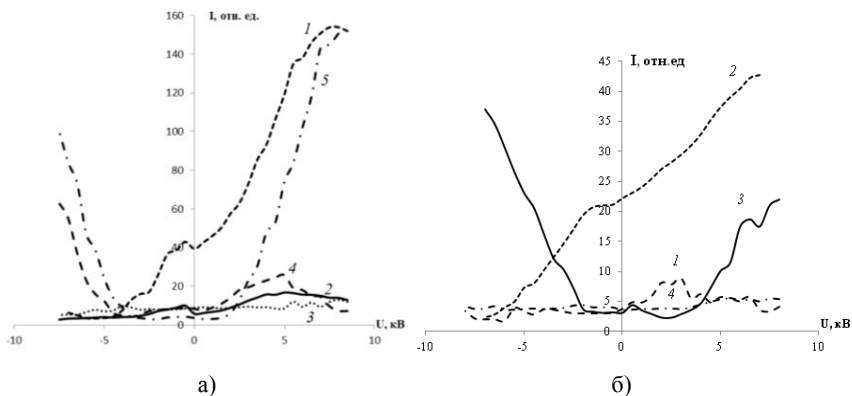


Рис. 1. Зависимости интенсивности прошедшего излучения от приложенного напряжения для кристаллов LiNbO_3 с содержанием: а) цинка $[\text{Zn}]$: 1 – 0.02 вес.%; 2 – 0.03 вес.%; 3 – 0.52 вес.%; 4 – 0.62 вес.%; 5 – 0.88 вес.%; б) магния $[\text{Mg}]$: 1 - 0.25; 2 - 0.5 вес.%; бора $[\text{B}]$: 3 - 0.08; 4 - 0.12 вес.%

Список литературы

1. Черная Т.С., Волк Т.Р., Верин И.А. и др. // Кристаллография. 2008. Т.53. №4. С.612-617.
2. Зубреева А.А., Педько Б.Б. // Нано- и микросистемная техника. 2007. №4. С.34-38.

М.В. БРЕЦЬКО, С.Н. ЛАПАЕВА

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНОСКОПИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ С СИНГУЛЯРНОСТЯМИ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ

В данной работе рассмотрены основные проблемы исследования электрооптических свойств кристалла, на примере LiNbO_3 , с помощью поляризационных сингулярностей. Как оказалось, воздействие поперечного электрического поля на кристалл вызывает изменение поляризационной структуры – появляются дополнительные поляризационные сингулярности. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в одноосном кристалле под воздействием поперечного электрического поля, изменяются анизотропные свойства кристалла, что приводит к преобразованию одноосного кристалла в двухосный.

M.V. BRETSKO, S.N. LAPAEVA

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

INTERACTION MONOSCOPICALLY PATTERNS WITH SINGULARITIES IN THE ELECTRO-OPTIC CRYSTAL

In this paper, we consider the basic problems of study electrooptical properties of the crystal, for example LiNbO_3 , using a polarizing singularities. As it turned out, the effects of transverse electric field on the crystal causes a change in polarization structure, an additional polarization singularity. The obtained results show that in a uniaxial crystal under the influence of a transverse electric field to change the anisotropic properties of the crystal, which leads to the transformation of a uniaxial crystal to biaxial.

Традиционно при изучении распространения электромагнитных волн в анизотропных средах, в том числе и при наличии внешнего электрического поля, используется метод эллипсоида показателей преломления (или оптической индикатрисы). Данный метод, хотя и является следствием электромагнитной теории света, однако не всегда удобен для оценки эффекта, поскольку предусматривает графическую интерпретацию и в большей степени качественный анализ особенностей распространения электромагнитных волн в анизотропных средах, в частности в электрооптических кристаллах [1].

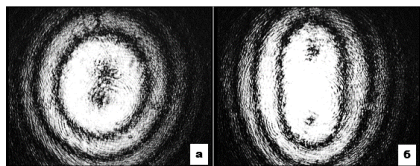


Рис. 1. Картина интенсивности Y компоненты циркулярно-поляризованного пучка кристалла LiNbO_3 : без электрического напряжения (а); с электростатическим напряжением 8000 В (б)

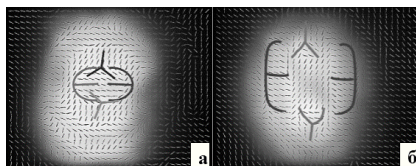


Рис. 2. Тонкая поляризационная структура сингулярного гауссова пучка после кристалла LiNbO_3 : без электрического напряжения (а); с электростатическим напряжением 8000 В (б)

В данной же работе для оценки эффекта Поக்கельса использовался метод поляризационных сингулярностей. Стоит отметить, что данный метод нагляден для количественной оценки эффекта, а также подчеркивает простоту и точность реализации данного исследования. Для исследования влияния эффекта Поக்கельса на поляризационные сингулярности сформированные в кристалле LiNbO_3 был использован дифференциальный поляриметр.

Как оказалось, при внесении в кристалл внешнего электрического поля распределение Y компоненты вектора Стокса деформируется (рис. 1), а диполи, находящиеся в центре, смещаются от центра к периферии [2]. Проведено исследование распределение тонкой поляризационной структуры для право циркулярно-поляризованного гауссова пучка на входе кристалла (рис. 2). В отсутствии возмущения в центре картины формируются две пары поляризационных сингулярностей типа «лимон» и «звезда» Подавая электрическое поле на обкладки конденсатора поляризационные сингулярности смещаются [3].

Список литературы

1. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987.
2. Egorov Yu., Fadeyeva T., Volyar A. The fine structure of singular beams in crystals: colours and polarization // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2004. V.6. P.S217-S228.
3. Егоров Ю.А. Тонкая структура монохроматических и полихроматических сингулярных пучков в одноосном кристалле: дис. кандидата физ.-мат. наук. Симферополь, 2005.

Л.А. БОБРЕВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

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

ВОДОРОДНЫЕ СВЯЗИ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$

Методом ИК-спектроскопии поглощения в области валентных колебаний OH групп исследована серия монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($0.04 \div 4.61$ мол. % ZnO). Установлено, что полосы поглощения с частотой 3483 и 3486 cm^{-1} соответствуют колебаниями $((V_{\text{Li}}) - \text{OH}^-)$ комплекса. Дефектному комплексу $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$ соответствуют полосы поглощения с частотой 3500 и 3527 cm^{-1} .

L.A. BOBREVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

HYDROGEN CONNECTIONS IN CRYSTALS $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$

The series single crystals of $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($0.04 \div 4.61$ mol% ZnO) was studied by IR absorption spectroscopy in the valence vibrations region of OH groups. It has been established that the absorption bands at a frequency of 3483 and 3486 cm^{-1} correspond to vibrations $((V_{\text{Li}}) - \text{OH}^-)$. The new defect complex $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$ corresponds to the absorption band with a frequency of 3500 and 3527 cm^{-1} .

В настоящее время актуально получение высокосовершенных оптических материалов на основе нелинейно-оптического монокристалла ниобата лития (LiNbO_3). Одной из важных особенностей вторичной структуры, влияющей на многие физические свойства кристалла LiNbO_3 , выращенного в воздушной атмосфере, является наличие протона (H^+), включённого в структуру кристалла в процессе роста [1]. Концентрация протонов в кристалле LiNbO_3 колеблется от 10^{18} до 10^{19} cm^{-3} [2]. Водород в структуре кристалла LiNbO_3 образует примесный гидроксильный комплекс OH^- .

Методом ИК-спектроскопии поглощения в области валентных колебаний OH- групп были исследованы структурные особенности серии монокристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ ($0.04 \div 4.61$ мол. % ZnO), выращенных из конгруэнтного расплава. Монокристаллы перспективны как материалы с низким эффектом фоторефракции.

Вхождение катионов Zn^{+2} (пороговые концентрации 2.0 мол. % и ~ 7.5 мол. % ZnO в расплаве) одновременно приводит к вытеснению дефектов

Nb_{Li} и замещение базовых катионов Li^+ [3]. Ионы примеси не влияют на присоединение H^+ , поскольку они являются положительно заряженными дефектами по отношению к кристаллической решетке, а значит, не притягивают протоны. Следовательно, полосы поглощения с частотой 3483 и 3486 см^{-1} , соответствующие валентным колебаниям OH групп в комплексе, не изменяют своего положения (рис. 1).

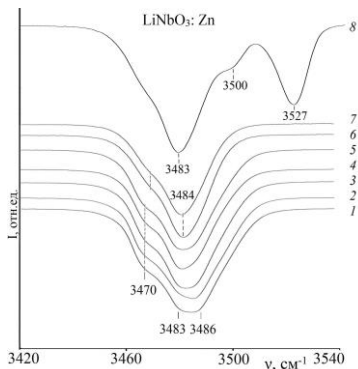


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения монокристаллов 1 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.04 мол. % ZnO), 2 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (0.07), 3 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (1.19), 4 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (1.40), 5 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (1.42), 6 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (2.00), 7 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (4.46), 8 - $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}$ (4.64)

С другой стороны, с увеличением концентрации Zn^{+2} , некоторые из этих ионов начинают занимать Nb -позиции. Таким образом, ионы примеси действуют, как отрицательно заряженные дефекты ($\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-}$) в кристаллической решетке. Эти новые дефекты способны привлечь протоны, образуя $\text{Zn}_{\text{Nb}}^{3-} - \text{OH}^-$ комплекс, которому соответствуют полосы поглощения с частотой 3500 и 3527 см^{-1} , рис. 1.

Список литературы

1. Cabrera J.M., Olivares J., Carrascosa M., Rams J., Müller R., Diéguez E. Hydrogen in lithium niobate // *Advances in Physics*. 1996. V.45. №5. P.349-392.
2. Kong Y., Xu J., Zhang W., Zhang G. The site occupation of protons in lithium niobate crystals // *J. Phys. Chem. Solids*. 2000. V.61. P.1331.
3. Сидоров Н.В., Палатников М.Н. Спектры комбинационного рассеяния света сильно легированных магнием и цинком кристаллов ниобата лития // *Оптика и спектроскопия*. 2016. Т.121. №6. С.66-74.

О.Ю. ПИКУЛЬ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА В ЛАЗЕРНОЙ КОНОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛА

Возможности лазерного коноскопического метода расширены за счет введения в оптическую систему компенсатора с известным оптическим знаком, что приводит к изменениям коноскопической картины кристаллической пластинки, которые позволяют быстро и достоверно определить ее оптический знак, наличие оптической активности кристалла, направление вращения плоскости поляризации излучения для кристаллических пластинок любой толщины и любой величины удельного вращения.

О.Yu. PIKOUL

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

USE OF COMPENSATOR IN LASER CONOSCOPIC METHOD TO ANALYZE OPTICAL PARAMETERS OF CRYSTAL

Possibilities of laser conoscopic method expanded due to the introduction of compensator in the optical system of the investigated crystal plate. The introduction of compensator with known optical sign leads to changes the conoscopic pattern of the investigated crystal plate. Changes conoscopic patterns allow to quickly and reliably determine the optical sign, the presence of optical activity of the crystal, the direction of rotation of the plane of polarization of radiation in optically active crystal for crystal plates of any thickness and any value of the specific rotation.

В оптической системе между поляризатором и рассеивателем помещают компенсатор (рис. 1), например, фазовую пластинку $\lambda/4$. На экране наблюдают четкую коноскопическую картину исследуемой кристаллической пластинки с циркулярно поляризованным излучением, которое создается пластинкой $\lambda/4$. При повороте фазовой пластинки $\lambda/4$ коноскопическая картина изменяется и кольца–изохромы смещаются в пределах каждой четверти картины в своем направлении. В зависимости от знака фазовой пластинки и направления смещения изохром делают вывод об оптическом знаке исследуемой пластинки. Если исследуемой является оптически активная кристаллическая пластинка, то использование фазовой пластинки $\lambda/4$ в качестве компенсатора (теперь

неподвижного) позволяет одновременно определить и оптический знак, и направление вращения плоскости поляризации излучения.

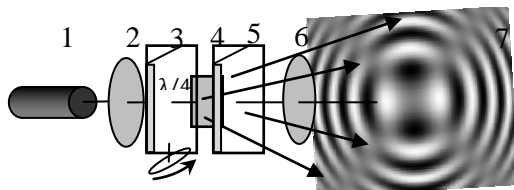


Рис. 1. Схема установки: 1 – He-Ne лазер; 2 – поляризатор; 3 – компенсатор; 4 – рассеиватель; 5 – исследуемая кристаллическая пластинка; 6 – анализатор, скрещенный с поляризатором; 7 – экран

В этом случае при наблюдении коноскопических картин в указанной установке на экране наблюдают спиралевидные изохромы, закрученные по или против часовой стрелки, с началами спиралей или в первом и третьем квадрантах, или во втором и четвертом квадрантах (рис. 2).

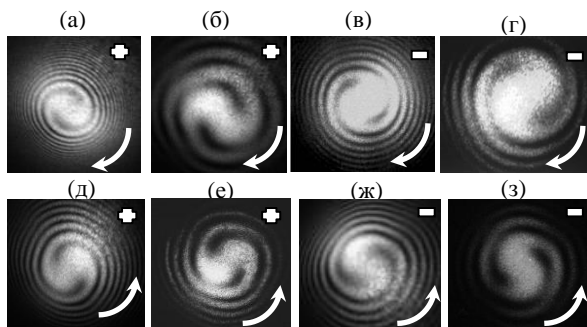


Рис. 2. Правовращающие кристаллы: TeO_2 , толщина 7.0 мм; положительный оптический знак (а), TeO_2 , толщина 0.5 мм; положительный оптический знак (б), LiJO_3 , толщина 3.1 мм; отрицательный оптический знак (в), LiJO_3 , толщина 1.0 мм; отрицательный оптический знак (г); левовращающие кристаллы: TeO_2 , толщина 3.0 мм; положительный оптический знак (д), TeO_2 , толщина 1.2 мм; положительный оптический знак (е), LiJO_3 , толщина 3.8 мм; отрицательный оптический знак (ж), LiJO_3 , толщина 0.3 мм; отрицательный оптический знак (з)

Достоверность результатов эксперимента подтверждается справочными данными для указанных кристаллов. Кроме того, по коноскопическим картинам кристаллов с использованием пластинки $\lambda/4$ можно оценить интервал фазового сдвига эллиптически поляризованного излучения.

В.Г. ДЮ, Д.В. СОКОЛОВ, Т.Д. ТОКМАШЕВ, С.М. ШАНДАРОВ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, ИНДУЦИРОВАННОГО
НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Экспериментально исследована динамика изменения оптического поглощения на длине волны 655 нм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, индуцируемого пакетом, состоящим из нескольких лазерных импульсов с длиной волны 526,5 нм, длительностью 10 нс и энергией от 9 до 15 мкДж.

V.G. DYU, D.V. SOKOLOV, T.D. TOKMASHOV, S.M. SHANDAROV
Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

**DYNAMICS OF THE OPTICAL ABSORPTION
IN THE $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ CRYSTAL INDUCED
BY NANOSECOND LASER PULSES**

The dynamics of the changes in optical absorption in $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ crystal at the wavelength of 655 nm, which were induced by a packet consisting of several laser pulses with wavelength of 526,5 nm, pulse width of 10 ns and energy from 9 to 15 μJ , had been experimentally investigated.

В [1] сообщалось, что засветка кристалла титаната висмута наносекундными лазерными импульсами на длине волны 532 нм приводит к увеличению поглощения в спектральном диапазоне 492-840 нм, с релаксацией наведенных изменений в течение более 60 часов в темновых условиях. Динамика изменений в оптическом поглощении на длине волны 633 нм, индуцированных в нелегированном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ лазерными импульсами с длиной волны 532 нм, длительностью 70 пс и энергией около 50 мДж исследовалась в работе [2].

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментов по изучению динамики изменений в оптическом поглощении на длине волны $\lambda_p = 655$ нм в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, которые вызывались пакетом из нескольких лазерных импульсов, имеющих длину волны $\lambda_i = 526,5$ нм, длительность 10 нс и энергию от 9 до 15 мкДж. В экспериментах исследовался образец кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, имеющий полированные грани и толщину $d = 6,6$ мм вдоль кристаллографического направления [100]. Пакет индуцирующих лазерных импульсов формировался из

периодической последовательности с частотой следования f_p от 10 до 30 Гц, а их число определялось выдержкой, устанавливаемой с помощью механического затвора фотокамеры ФЭД-3. Энергия импульсного излучения на входной грани кристалла составляла от 9 до 15 мкДж/см². Для регистрации изменений в наведенном поглощении использовалось излучение непрерывного лазера с длиной волны $\lambda_p = 655$ нм, фиксируемое с помощью pin-фотодиода BPW24R и осциллографа Tektronix TDS 2012B.

Характерные картины временной эволюции изменений оптического поглощения в кристалле $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ на длине волны 655 нм, во время и после воздействия индуцирующего импульсного излучения, показаны на рис. 1. Рост фотоиндуцированного поглощения индуцируется каждым из импульсов, и происходит только за время их воздействия на кристалл. Как видно из рис. 1б, в промежутке между двумя импульсами (~ 33 мс) наблюдается частичная релаксация наведенных изменений в поглощении. При воздействии единственным импульсом (см. рис. 1а) поглощение кристалла возвращается к исходному состоянию за время, составляющее около 150 мс.

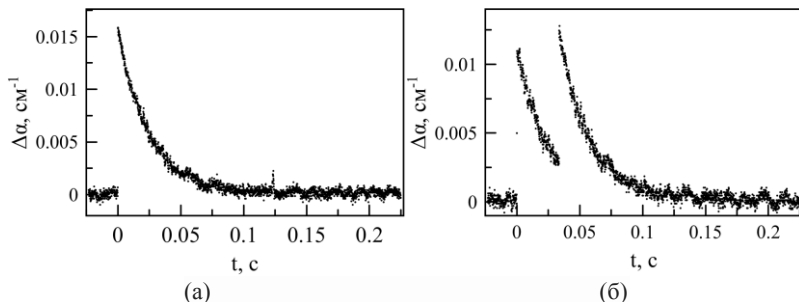


Рис. 1. Временные зависимости изменений коэффициента поглощения на длине волны 655 нм, индуцированных в кристалле $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ наносекундными лазерными импульсами с длиной волны 526,5 нм: одиночный импульс, $f_p = 10$ Гц (а); пакет из двух импульсов, $f_p = 30$ Гц (б)

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017-2019 годы (проект №3.8898.2017/8.9) и РФФИ (грант № 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю. и др. // Квантовая электроника. 2007. Т.37 (11). С.1027.
2. Кистенева М.Г., Акрестина А.С. и др. // Доклады ТУСУР. 2010. №2. Ч.2. С.145.

В.А. МАКСИМЕНКО

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ
В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ
МЕТОДОМ**

В работе обсуждаются вопросы исследования оптически наведенных дефектов в фоторефрактивных кристаллах. Рассматривается возможность применения для этой цели интерференции поляризованных лучей. Представлена экспериментальная установка, позволяющая исследовать оптически наведенные дефекты в фоторефрактивных материалах.

V.A. MAKSIMENKO

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

**INVESTIGATION OF THE PHOTOINDUCED DEFECTS
IN THE PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS
WITH POLARIZATION INTERFERENCE METHOD**

The problems of photoinduced defects in the photorefractive crystals investigation with polarization interference method are considered. The experimental setup is presented.

Оптически наведенные (фотоиндуцированные) дефекты в фоторефрактивных кристаллах представляют собой объекты, изучение которых важно как в фундаментальном, так и в прикладном аспекте [1].

Поскольку поляризация световых волн в значительной степени изменяется в области фотоиндуцированного дефекта [1], то для исследования таких дефектов имеет смысл применить методику анализа интерференции поляризованных лучей.

В одноосном кристалле вектор напряженности световой волны разделяется на две составляющие: обыкновенную и необыкновенную. Набег их фаз на выходе из кристалла различен.

Когда разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами равна

$$\delta=2\pi d\Delta n/\lambda=2m\pi \quad (1)$$

(d – толщина кристалла, Δn – разность необыкновенного и обыкновенного показателей преломления, λ – длина волны в вакууме, m – целое число),

через систему поляризатор – кристалл – анализатор свет не проходит. Для кристалла ниобата лития на длине волны $0,63 \text{ мкм}$ $\Delta n = 0,09$. Подобрать кристаллическую пластинку необходимой толщины для реализации условия (1) достаточно сложно. Однако можно обеспечить нулевую интенсивность прошедшего света поворотом кристаллической пластинки на определенный угол.

Если в настроенной на нулевую интенсивность системе пропустить через кристалл излучение с достаточной интенсивностью, то оно создаст в кристалле фотоиндуцированный дефект. Он будет заметен на затемненном поле, поскольку в его области разность показателей преломления кристалла изменится на величину Δn_{Φ} за счет фоторефрактивного эффекта, и, соответственно, разность фаз изменится на величину δ_{Φ} .

Выражение для интенсивности прошедшего излучения можно тогда свести к виду:

$$I=I_0(1+\cos\delta_{\Phi})/2. \quad (2)$$

Это означает, что можно находить величину фотоиндуцированного изменения показателя преломления по экспериментально измеренной интенсивности прошедшего систему излучения.

Экспериментально, в процессе наведения фотоиндуцированного дефекта, получив зависимость интенсивности от времени $I(t)$ и сопоставив ее с выражением (2), можно найти зависимость от времени для Δn_{Φ} .

Схема разработанной экспериментальной установки для описанного выше эксперимента представлена на рис. 1.

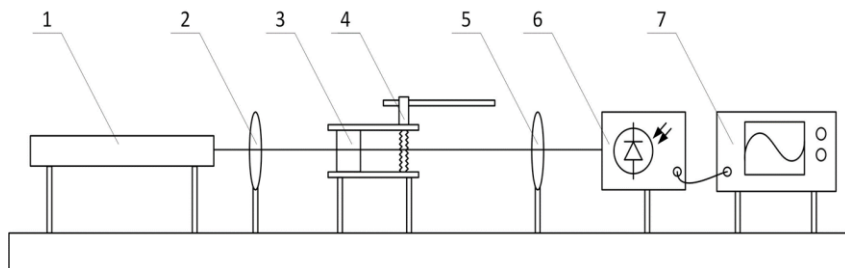


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – образец, 4 – устройство для поворота кристалла, 5 – анализатор, 6 – фотоприемник, 7 – осциллограф

Список литературы

1. Gunter P. ,Huignard J.-P. Photorefractive materials and their applications 2. Materials. Springer Science + Busyness Media LLC, 2007.

А.И. КОЛЕСНИКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, С.А. ТРЕТЬЯКОВ,
Р.М. ГРЕЧИШКИН, М.Б. ЛЯХОВА, С.С. РЫБИНА, М.С. ВОРОНЦОВ
Тверской государственной университет

**ЗАКОНОМЕРНО ОРИЕНТИРОВАННЫЕ БЛИКИ
ПРИ ОТРАЖЕНИИ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА
ОТ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Исследовано явление, состоящее в селективном отражении лазерного света в строго определенных направлениях от поверхностей монокристаллов, отполированных по максимально высоким классам чистоты. Установлено, что направления бликов всегда ортогональны плоскостям спайности кристаллов, исследованных веществ - германия и парателлурита, а размеры площадок, образованных неровностями на поверхностях и отражающих свет, составляют не более 10–20 нм. Обнаруженный эффект должен учитываться при разработке технологий полировки элементов лазерной техники и оптоэлектроники на основе кристаллов.

A.I. KOLESNIKOV, I.A. KAPLUNOV, S.A. TRETIAKOV,
R.M. GRECHISHKIN, M.B. LYAKHOVA, S.S. RYBINA,
M.S. VORONTSOV
Tver State University

**REGULARLY ORIENTED FLARE SPOTS OF LASER LIGHT
REFLECTION FROM POLISHED SINGLE CRYSTAL SURFACES**

A study is made of the effect of selective laser light reflection in exactly defined directions from the thoroughly polished surfaces of single crystals. It was found that the flare directions are orthogonal to the cleavage surfaces of the germanium and paratellurite crystals under study while the size of the reflecting platforms formed at the surface irregularities does not exceed 10–20 nm. The discovered feature should be taken into account in the development of polishing technology for preparation of crystals for laser and optoelectronic techniques.

При исследованиях оптической однородности элементов из монокристаллов парателлурита обнаружено, что на поверхности, на которую попадает луч, отраженный от элемента, помимо центрального пятна, соответствующего его правильному положению, наблюдаются яркие полосы-блики, отходящие от центрального пятна (рис. 1). Такие же блики обнаружены при отражении лучей от полированных поверхностей

кристаллов германия. Эффект не описан в литературе и способен создавать помехи для правильного функционирования оптических систем. Цель настоящей работы заключалась в объяснении физической природы появления резких максимумов в индикатрисах отражения лазерного света от полированных монокристаллов.

Оказалось, что блики не связаны с поляризацией света. При вращении лазера, излучающего линейно поляризованный свет, вокруг своей оси, изменений расположения бликов или их интенсивности не наблюдалось. Направления бликов связаны с определенными кристаллографическими направлениями: для парателлурита – $[100]$, для германия – $[111]$. Поскольку при повороте кристалла вокруг оси луча блики поворачиваются вместе с кристаллом, их происхождение связано только со структурой отражающей поверхности. Однако при оптических исследованиях полированных поверхностей кристаллов никаких макроскопических, закономерно расположенных неровностей не выявлено. Но при использовании методов РЭМ и АСМ обнаружено, что неровности наноразмеров, остающиеся после полировки, имеют преимущественный наклон к поверхности, соответствующий плоскостям спайности кристаллов: у парателлурита – (100) , у германия – (111) . На рис. 2 показан полученный методом АСМ нанопрофиль поверхности (110) кристалла парателлурита с неровностями, совпадающими с плоскостями спайности. Таким образом, причина появления бликов состоит в том, что одинаково ориентированные неровности наноразмеров играют роль зеркал, от которых отражается часть света из падающего лазерного луча. С теоретической точки зрения эффект интересен тем, что размеры неровностей в 10–100 раз меньше длины волны излучения.



Рис. 1. Блики на удаленном экране при отражении лазерного излучения от плоской поверхности оптического элемента из монокристалла парателлурита

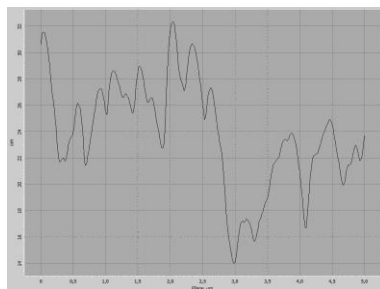


Рис. 2. Профиль полированной поверхности монокристалла парателлурита, полученный методом АСМ

Е.С. СИМ, С.М. ШАНДАРОВ, М.Г. КИСТЕНЕВА,
Т.А. ЖУРИН, С.В. СМОРНОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

λ-МОДУЛЯЦИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА

Представлены результаты моделирования временной зависимости фотопроводимости в кристалле германата висмута при модуляции оптического излучения по длине волны.

E.S. SIM, S.M. SHANDAROV, M.G. KISTENEVA,
T.A. ZHURIN, S.V. SMIRNOV

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

λ-MODULATION OF PHOTOCONDUCTIVITY IN THE BISMUTH GERMANIUM OXIDE CRYSTAL

The results of simulation of time dependence of the photoconductivity in a bismuth germanium oxide crystal by the wavelength modulation of optical radiation are presented.

Метод модуляционной спектроскопии позволяет выявить структуру полос, обусловленных в кристаллах процессами фотовозбуждения дефектных центров [1]. В настоящей работе представлены результаты моделирования временной зависимости фотопроводимости в кристалле германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, BGO) при модуляции возбуждающего излучения по длине волны (λ -модуляция). Для моделирования использовалась аппроксимация экспериментальной зависимости показателя поглощения $k(\lambda)$ в кристалле BGO с толщиной 1,8 мм по приведенным в работе [2] соотношениям, учитывающим аддитивный вклад в примесное поглощение $k_{dD}(\lambda)$ процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии. Длина волны возбуждающего фотопроводимость светового излучения принималась зависящей от времени по гармоническому закону

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (1)$$

с периодом T и глубиной модуляции $\Delta\lambda$ вблизи центральной длины волны λ_0 . В этом случае фотопроводимость кристалла $\sigma(t)$, которая с учетом известных соотношений [3] может быть получена в виде

$$\sigma(t) = \frac{e\mu I}{hc\gamma_r N_A} \lambda k_{ad}(t), \quad (2)$$

где e и μ – элементарный электрический заряд и подвижность электрона, I – интенсивность света, γ_r – коэффициент рекомбинации и N_A – концентрация отрицательно заряженных акцепторов, будет представлять сумму гармонических составляющих с периодами T/n , определяемыми номером гармоники n .

На рис. 1 представлены результаты моделирования для центров с нормальным распределением спектральной плотности вклада в поглощение по энергии ионизации $B(\lambda_0)$ вблизи 2,76 эВ [2] (кривая 1, $\lambda_{0max} = 450$ нм), где точками показаны зависимости 2, 3 и 4 от центральной длины волны λ_0 для Фурье-компонент σ_0 , σ_1 и σ_2 во временном разложении фотопроводимости, при $\Delta\lambda = 10$ нм. В спектральной области от 520 до 370 нм $\sigma_0(\lambda_0)$ монотонно возрастает, в то время как на длине волны $\lambda_{0phm} = 439$ нм, отличающейся от λ_{0max} , $\sigma_1(\lambda_0)$ достигает экстремума, а $\sigma_2(\lambda_0)$ проходит через нулевое значение.

Таким образом, экспериментальная реализация метода λ -модуляции фотопроводимости в кристалле BGO может позволить идентифицировать донорные центры, с которых возможно фотовозбуждение электронов в зону проводимости, для спектральной области 370 – 520 нм.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017 год (проект № 3.8898.2017/БЧ) и РФФИ (грант №16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Георгобиани А.Н. // Соросовский образовательный журнал. 2001. №6. С.75.
2. Кистенева М.Г., Худякова Е.С. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т.45 (7). С.685.
3. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963.

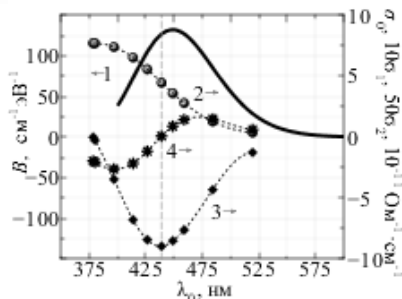


Рис. 1. Спектральные зависимости параметра B (1) и Фурье-составляющих спектра модуляции фотопроводимости $\sigma_0(2)$, $\sigma_1(3)$ и $\sigma_2(4)$ в кристалле BGO

И.Р. ПРУДНИКОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОСОБЕННОСТИ ДИФРАКЦИИ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ В 1-D ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С НЕСКОЛЬКИМИ УЛЬТРАТОНКИМИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ СЛОЯМИ

Проведено аналитическое исследование оптических коэффициентов зеркального отражения и пропускания 1-D фотонного кристалла, который содержит повторяющиеся ультратонкие (толщина слоя около 1 нм) разделительные слои. Подробно рассмотрен частный случай двух разделительных пленок. Показано, что в зависимости от разницы между их толщинами и/или показателями преломления коэффициент зеркального отражения от всей структуры имеет один или два резонансных минимума в пределах фотонной запрещенной зоны. Определены условия, при которых интенсивность световой волны в окрестности каждой из ультратонких пленок резонансно возрастает или падает.

I.R. PRUDNIKOV

Lomonosov Moscow State University

PECULIARITIES OF LIGHT WAVE DIFFRACTION IN A 1-D PHOTONIC CRYSTAL WITH A FEW EXTREMELY THIN SPACER LAYERS

An analytical study of specular light wave reflection and transmission coefficients by a 1-D photonic crystal having repeated ultra-thin spacer layers (the thickness of such a layer is nearly 1 nm) is performed. The specific case of two spacer films is comprehensively investigated. It is shown that the specular light wave reflectivity coefficient of an entire structure is characterized by one or two resonant dips within a photonic band gap domain, depending on the difference between their thicknesses and/or refraction indexes. The conditions of a resonant increase or suppression of light-wave intensity in the vicinity of any of these ultra-thin films are found.

Физические модели 3-D и 2-D фотонных кристаллов с внедренными в них повторяющимися дефектами (дефектными слоями) были предложены в работах [1]. Распространение световой волны/световых импульсов в таких структурах характеризуется рядом интересных физических эффектов [2]. Многократные разделительные/дефектные слои, помещенные в 1-D фотонный кристалл (ФК), также приводят к изменению оптических свойств ФК. Например, оптические и нелинейно-оптические эффекты в случае ФК с двумя разделительными слоями исследовались в [3].

В настоящем сообщении, с использованием результатов работы [4], получены компактные аналитические выражения для коэффициентов зеркального отражения и пропускания ФК с произвольным количеством разделительных слоев. Подробно рассмотрен частный случай двух внедренных в ФК пленок, когда одна или обе пленки имеют толщину ≈ 1 нм. На рис. 1а приведены рассчитанные кривые, которые показывают длины волн, λ_r , определяющие положения резонансных минимумов коэффициента зеркального отражения от такой структуры. Указанные резонансные минимумы появляются в пределах фотонной запрещенной зоны [1, 3]. Из рис. 1а следует, что i) на кривой зеркального отражения присутствуют один или два резонансных минимума в зависимости от разницы между толщинами этих двух пленок и ii) два значения для λ_r существуют даже в случае ультратонких пленок с толщинами менее 1 нм. В сообщении мы объясняем эти особенности на основе полученных аналитических выражений. Рис. 1б иллюстрирует коэффициенты зеркального отражения/пропускания, когда λ_r имеет два (кривые 1) или одно (кривые 2) значение. Мы также провели исследование сильного увеличения/подавления интенсивности стоячей световой волны в окрестности каждого из разделительных слоев при "переключении" резонансных длин волн (см. рис. 1а). Результаты расчетов, приведенные в сообщении, выполнены для ФК $N \times (\text{ZnS}/\text{SrF}_2)$ где N число бислоев.

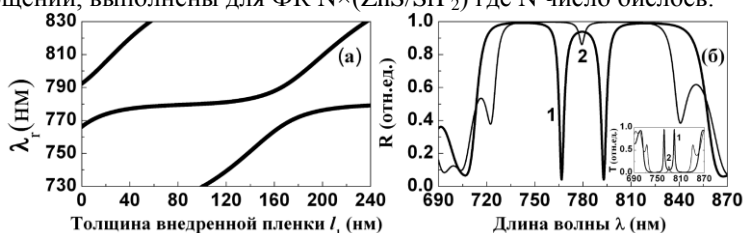


Рис. 1. Резонансная длина волн, λ_r , в зависимости от толщины одной внедренной пленки, l_1 , толщина другой пленки постоянна: $l_2=1$ нм (а); коэффициент зеркального отражения R , и пропускания (вставка) T для ФК с двумя внедренными пленками, толщины пленок $l_1=l_2=1$ нм (1); $l_1=80$ нм, $l_2=1$ нм (2) (б)

Список литературы

1. Yariv A., et al. // Opt. Lett. 1999. V.24. P.711.
2. Bayindir M., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V.84. P.2140.
3. Soljačić M., Joannopoulos J.D. // Nat. Mater. 2004. V.3. P.211.
4. Stanley R.P., et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V.65. P.2093.
5. Pavesi L., et al. // Phys. Rev. B. 1998. V.58. P.15794.
6. Gusev D.G., et al. // Phys. Rev. B. 2003. V.68. P.233303.
7. Prudnikov I.R. // Physica B. 2016. V.481. P.172.

А.В. ПУСТОЗЕРОВ, Д.В. ОКУНЕВ, В.М. ШАНДАРОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ САМОФОКУСИРОВКИ
СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ
С ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИМ МЕХАНИЗМОМ
НЕЛИНЕЙНОГО ОТКЛИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ФОНОВОЙ ПОДСВЕТКИ**

В работе экспериментально исследуется влияние излучения некогерентных источников с различными центральными длинами волн, на величину и знак фоторефрактивного отклика в кристалле ниобата лития. Экспериментально продемонстрирована компенсация нелинейной дифракции когерентного светового пучка и достижение режима его самофокусировки при воздействии на кристаллический образец некогерентного светового излучения.

A.V. PUSTOZEROV, D.V. OKUNEV, V.M. SHANDAROV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**RESEARCH OF CONDITIONS OF SELF-FOCUSING OF LIGHT
BEAMS IN LITHIUM NIOBATE WITH PHOTOVOLTAIC
MECHANISM OF THE NONLINEAR RESPONSE
UNDER THE INFLUENCE OF BACKGROUND ILLUMINATION**

The influence of incoherent radiation with distinct central wavelengths on the value and sign of photorefractive response in lithium niobate crystal is experimentally investigated. Compensation of nonlinear diffraction of coherent light beam with obtaining of its self-focusing regime in conditions of crystal sample illumination with incoherent has been experimentally demonstrated.

При распространении света в нелинейных оптических средах проявляются эффекты самовоздействия, например самофокусировка или самодефокусировка световых пучков. В фоторефрактивных кристаллах, таких как ниобат лития (LiNbO_3) или стронций-бариевый ниобат (SBN), это возможно даже при микроваттных световых мощностях. В LiNbO_3 с фотовольтаическим механизмом транспорта носителей электрического заряда нелинейный отклик является самодефокусирующим [1]. Однако в материальной среде нелинейный отклик может быть обусловлен и другими механизмами [2, 3].

Целью данной работы является экспериментальная демонстрация влияния некогерентной фоновой подсветки с длинами волн видимого диапазона на величину нелинейного отклика LiNbO_3 на длине волны света 633 нм. На рис. 1 приведена схема эксперимента, в котором излучение светодиодов с длинами волн $\lambda = 455$ нм или $\lambda = 525$ нм вводится в кристалл через боковой торец, перпендикулярно направлению распространения светового пучка с $\lambda = 633$ нм. Образец $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (0.005 вес. %) имеет размеры $10 \times 5 \times 10$ мм³ вдоль осей X, Y и Z.

На рис. 2 представлены световые картины для лазерного пучка с $\lambda = 633$ нм на входной и выходной поверхностях кристалла (1,2), а также картины на выходной его поверхности при времени экспонирования 34 минуты при отсутствии подсветки (3) и в условиях с подсветкой $\lambda = 455$ нм (4). Диаметр «сигнального» пучка на входной грани составляет ~ 15 мкм при мощности 12 мкВт. Результаты указывают на полную компенсацию нелинейной дифракции и возможность самофокусировки когерентного пучка с $\lambda = 633$ нм в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$.

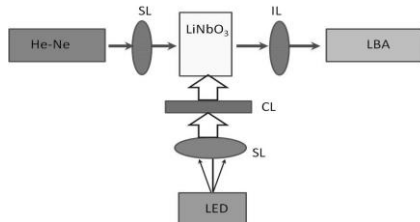


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

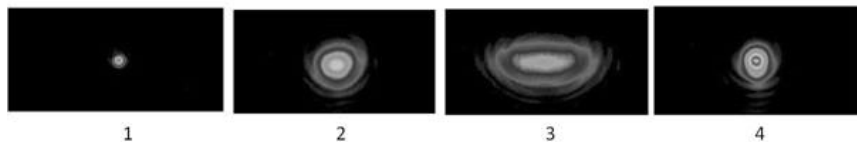


Рис. 2. Световые картины на входной и выходных гранях кристалла в линейном режиме (1) и (2), выходной грани в случае нелинейной дифракции при отсутствии подсветки (3) и в случае с подсветкой $\lambda = 455$ нм (4)

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (№3.1110.2017/4.6).

Список литературы

1. Kip D. // Appl. Phys. B. 1998. V.67. P.131-150.
2. Fazio E., Renzi F., Rinaldi R., Bertolotti M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V.85. P.2193.
3. Anastassiou Ch., Shih M., Mitchell M., Chen Z., Segev M. // Opt. Lett. 1998. V.23. P.924.

В.В. ГАЛУЦКИЙ, Е.М. ГУРСКАЯ, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО PPLN:Yb³⁺ УСИЛИТЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В работе промоделировано влияние градиента вектора волнового рассогласования на генерацию второй гармоники в активированном Yb³⁺ градиентном PPLN.

V. V. GALUTSKIY, E. M. GURSKAYA, N. A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

SIMULATION OF PPLN:Yb³⁺ GRADIENT AMPLIFIER OF OPTICAL SIGNALS

The work simulated the effect of the gradient wave vector mismatch on second harmonic generation in activated ions Yb³⁺ gradient PPLN.

Актуальность выбранной темы определяется разнообразием представленных на рынке продуктов, в которых генерация излучения на требуемой длине волны осуществляется в несколько этапов различными устройствами. Предлагаемое в данной работе решение – отказ от разнесения устройства на блок, в котором сигнал усиливается и блок генерации второй гармоники, это прямая аналогия с лазерами с распределенной обратной связью, только в качестве брэгговской решетки – доменная структура и коэффициент потерь на брэгговской решетке – аналогичен преобразованию излучения во вторую гармонику. Данный подход не является новым. В начале 2000-х [1] были попытки объединения нелинейных и генерационных свойств ниобата лития. Полученная эффективность составила 7,5 %. Общая эффективность оставалась низкой. Поэтому в данной работе предлагается модель оптического усилителя при постоянной концентрации иттербия и градиенте периода PPLN для повышения коэффициента усиления.

Моделирование осуществлялось по квазичетырёхуровневой схеме для Yb³⁺ и уравнений генерации второй гармоники для градиентного PPLN [2]. Поглощение излучения накачки предполагалось на длине волны 941 нм (или 954, или 980 нм), а излучение – на длине волны 1029 нм (или 1060 нм). Минус данной схемы с одновременным усилением и преобразованием излучения во вторую гармонику в том, что необходимо

сочетать достаточную длину PPLN для преобразования во вторую гармонику с положительной инверсией на протяженном участке преобразователя. Для нахождения необходимых в модели величин использовались измеренные спектры поглощения и излучения градиентных образцов.

На рис. 1 показана зависимость интенсивностей излучения (1060 нм) и его второй гармоники от мощности излучения накачки (954 нм) и длины активированного оптического усилителя. Как видно из графика, сначала достигается пороговое значение мощности накачки, после чего начинается генерация второй гармоники. В [2] было показано, что в случае наличия градиента периода или состава по основным компонентам в PPLN можно достигать пиковых значений в узком интервале мощности накачки. Применяя и здесь такой подход, можно обеспечить условия квазифазового синхронизма вдоль активированного Yb^{3+} PPLN таким образом, что на начальном этапе усиления отбор мощности во вторую гармонику будет минимальным, увеличиваясь по длине преобразователя. Таким образом, можно повысить эффективность преобразования и обеспечить усиление оптического сигнала и его преобразование в одном элементе активированного Yb^{3+} градиентного PPLN.

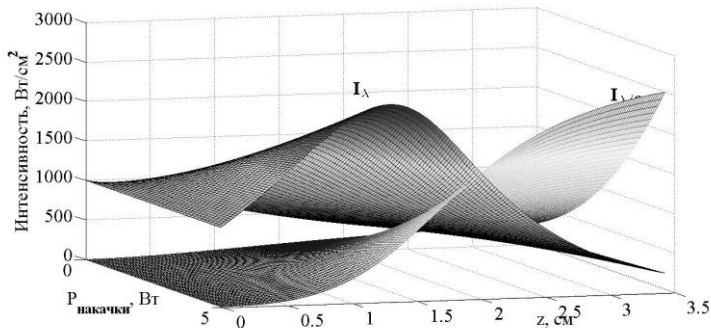


Рис. 1. Спектр усиления Yb^{3+} в градиентном PPLN

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-230209 p_a.

Список литературы

1. Capmany J., Montoya E., Bermudez V., Callejo D., Dieguez E., Bausa L.E. // Applied Physics Letters..2000. V.76. P.1374-1376.
2. Galutskiy V.V., Stroganova E.V., Shmargilov S.A., Yakovenko N.A. // Quantum Electronics. 2014. V.44. P.30-33.

А.А. ИОНИН¹, И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, Ю.М. КЛИМАЧЕВ¹,
В.А. МОЖАЕВА^{1,2}, Д.В. БАДИКОВ³, В.В. БАДИКОВ³

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Московский государственный университет геодезии и картографии

³Кубанский государственный университет, Краснодар

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СО ЛАЗЕРА В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ BaGa₂GeSe₆

Проведено численное исследование преобразования частоты излучения неселективного СО лазера в новом нелинейном кристалле BaGa₂GeSe₆. Продемонстрировано, что в этом кристалле возможно широкополосное двухкаскадное преобразование частоты излучения неселективного СО лазера в интервал длин волн от 2.5 до 9 мкм с большей эффективностью, чем в кристалле ZnGeP₂.

A.A. IONIN¹, I.O. KINYAEVSKIY¹, Yu.M. KLIMACHEV¹,
V.A. MOZHAJEVA^{1,2}, D.V. BADIKOV³, V.V. BADIKOV³

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²Moscow State University of Geodesy and Cartography

³Kuban State University, Krasnodar

TRANSFORMATION OF THE FREQUENCY OF RADIATION OF THE CO LASER IN THE NONLINEAR CRYSTAL

A numerical investigation of frequency conversion in new nonlinear crystal BaGa₂GeSe₆ was carried out for multi-line CO laser. It was found that broadband two-stage frequency within 2.5 – 9 μm is possible in this crystal with higher efficiency than in ZnGeP₂ crystal.

Для решения некоторых научных и прикладных задач, необходимо иметь источник лазерного излучения, генерирующий в широкой полосе частот (в данном случае, ИК диапазона). Это особо интересно при анализе многокомпонентных газовых сред, где требуется выявить отдельные газовые составляющие, путем анализа специфики их взаимодействия с излучением различных частот.

Целью данной работы является теоретическое исследование двухкаскадного преобразования частоты излучения СО лазера, включающего в себя широкополосную генерацию суммарных и

разностных частот в одном образце нелинейного кристалла. Исследуется новый кристалл $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ и проводится его сравнение со «стандартом» нелинейных кристаллов среднего ИК диапазона – ZnGeP_2 . Важно отметить, что кристалл $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ обладает высоким порогом оптического разрушения (110 МВт/см^2) [1], что значительно выше чем у кристалла ZnGeP_2 (78 МВт/см^2) [2].

Для реализации рассматриваемого процесса необходимо выполнение не критичного спектрального фазового синхронизма в интервале длин волн генерации СО лазера, что в данных кристаллах выполняется.

Расчёт широкополосного двухкаскадного преобразования частоты излучения СО лазера проводился в приближении малой эффективности преобразования по методике, описанной в [3]. Углы фазового синхронизма кристаллов ZnGeP_2 и $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ для всего процесса двухкаскадного преобразования были фиксированные и составляли 48° и 22° , соответственно. В качестве импульса излучения накачки рассматривался импульс неселективного СО лазера [1]: 150 спектральных линий (длины волн от 5 до 7.5 мкм), пиковая мощность – 4 кВт. Длина кристалла принималась равной 5 мм.

Результаты расчетов (рис. 1) показали преимущество нового кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ перед «стандартом» среднего ИК – ZnGeP_2 , как по энергетическим, так и по спектральным характеристикам преобразованного излучения (в интервале длин волн от 2.5 до 9 мкм).

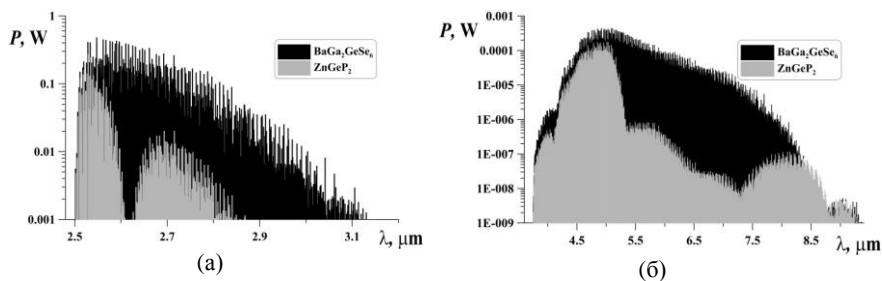


Рис. 1. Рассчитанные спектры генерации суммарных (а) и разностных (б) частот

Работа поддержана грантом РФФ №16-19-10619.

Список литературы

1. Badikov V.V., Badikov D.V., et. al. // Optical Material Express. 2016. V.6. P.2933.
2. Andreev Yu. M., Ionin A. A., et. al. // Quantum Electronics. 2013. V.43. P.139.
3. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals. 1999.

А.В. МАРЦЕВА, Е.Е. АБДИРАЛИ, С.М. ШАНДАРОВ, Е.С. СИМ,
С.В. СМIRНОВ, Л.Я. СЕРЕБРЕННИКОВ, А.А. КОЛЕГОВ¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл.*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР GaN/InGaN, ВЫРАЩЕННЫХ НА САПФИРОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования оптического пропускания коммерческих структур «GaN/InGaN-сапфир», предназначенных для производства синих светодиодов, в спектральном диапазоне 360 – 1100 нм.

A. V. MARTCEVA, E. E. ABDIRALI, S. M. SHANDAROV, E. S. SIM,
S. V. SMIRNOV, L. Ya. SEREBRENNIKOV, A. A. KOLEGOV¹

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

¹*Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk,
Chelyabinsk region*

SPECTRAL DEPENDENCES OF THE OPTICAL TRANSMITTANCE OF EPITAXIAL STRUCTURES GROWN ON SAPPHIRE SUBSTRATES

We report the experimental investigation and numerical modeling of optical transmittance in spectral region from 360 to 1100 nm for commercial structures “GaN/InGaN-sapphire” intended for production of blue light-emitting diodes.

Перспективными материалами для интегральной фотоники являются структуры на основе полупроводниковых нитридных соединений и гетероструктур GaN, AlN, AlGaN/AlN, InGaN [1, 2]. Коммерчески доступные планарные структуры «GaN/InGaN-сапфир», используемые для производства светодиодов, являются удобными модельными объектами для анализа влияния их оптических параметров на волноводные характеристики элементов интегрально-оптических схем. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования и численного моделирования спектральных зависимостей пропускания коммерческих структур «GaN/InGaN-сапфир», тыльная сторона сапфировых подложек у которых предварительно подвергалась оптической полировке.

Типичная спектральная зависимость оптического пропускания структуры GaN/InGaN/сапфир, используемой в массовом производстве светодиодов, с подвергнутой дополнительно оптической полировке тыльной стороной подложки, представлены на рис. 1а. Численное моделирование, результаты которого представлены на рис. 1б, показало необходимость учета дополнительного переходного слоя между основным слоем GaN/InGaN с толщиной 4.302 мкм и подложкой из сапфира, поглощением которой в исследуемом спектральном диапазоне 360 –1100 нм можно пренебречь. В расчетах использовались формулы Зельмейера для Al_2O_3 [3] и GaN [4] и модель оптического поглощения для основного слоя, учитывающая рассеяние Рэлея, внутрицентровый переход при $\lambda = 366$ нм и краевое поглощение, соответствующее правилу Урбаха. Наилучшее соответствие экспериментальных данных с расчетом имело место при толщине переходного слоя 49 нм и показателе преломления, вычисляемом по формуле Максвелла-Гарнета для композита GaN/ Al_2O_3 с фактором заполнения $f = 0.544$.

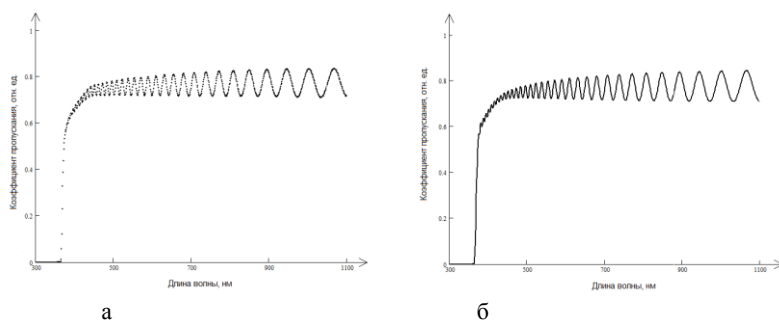


Рис. 1. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости оптического пропускания для структуры GaN/InGaN

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части Госзадания на 2017-2019 годы (№3.8898.2017/8.9) и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Soltani M., Soref R., Palacios T., Englund D. // Optics Express. 2015. V.24 (22). P.25415.
2. Кистенева М.Г., Акрестина А.С. и др. // Изв. Вузов. Физика. 2015. Т.58 (8-3). С.24.
3. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.И. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965.
4. Rigler M., Zgonik M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V.102. P.221106.

М.М. ВЕКШИН, М.А. КУПЛЕВИЧ,
В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ 1×4 В СТЕКЛЕ ИОННЫМ ОБМЕНОМ ИЗ РАСПЛАВА СОЛИ KNO₃

Представлена технология изготовления интегрально-оптических разветвителей 1×4 в стеклянных подложках методом ионного обмена, проводимого в расплаве соли KNO₃. После трехчасового ионного обмена при температуре 380°C диаметр каналов разветвителя составил 9 мкм, вносимые потери – 1,2 дБ при равномерности деления излучения по каналам 0,3 дБ.

М.М. VEKSHIN, М.А. KUPLEVICH,
V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO

Kuban State University, Krasnodar

FABRICATION OF GLASS INTEGRATED-OPTIC SPLITTERS 1×4 BY ION EXCHANGE IN KNO₃ SALT MELT

The fabrication technology of glass integrated-optic splitters 1x4 by ion exchange in salt melt KNO₃ is presented. After 3 hours of exchange with temperature 380 °C the diameter of channels is equal to 9 mm, the inserted losses – 1,2 dB, the uniformity of radiation division – 0,3 dB.

Интегрально-оптические разветвители используются в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) и в пассивных оптических сетях (PON), обеспечивающих широкополосную передачу информации абонентам.

Целью работы было изготовление канальных интегрально-оптических разветвителей 1x4 в стеклянных подложках методом ионного обмена из расплава соли KNO₃.

Интегрально-оптические разветвители изготавливались в стеклянных подложках размером 30×30×1,25 мм. На одну из сторон стеклянной пластинки методом термического вакуумного напыления наносился маскирующий слой алюминия толщиной 0,6 мкм.

Отверстия шириной 3 мкм в маскирующем слое алюминия изготавливались фотолитографией с использованием позитивного фоторезиста ФП-383, экспонирование которого проводилось на установке

безмасковой литографии μ PG-101 по чертежу, созданному в программе AutoCAD.

Внешний вид подготовленной для ионного обмена стеклянной подложки с маскирующим слоем представлен на рис. 1.

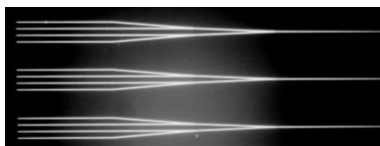


Рис. 1. Внешний вид отверстий

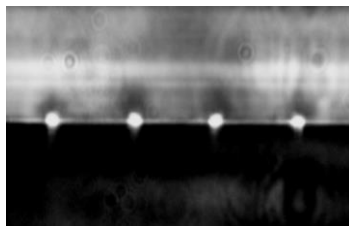


Рис. 2. Внешний вид выходного излучения

Подготовленная таким образом стеклянная подложка с маскирующим слоем помещалась в расплав соли KNO_3 . В процессе ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ ионы калия внедрялись в стекло, и приводили к увеличению показателя преломления в областях, не защищенных маскирующим слоем [1, 2]. Ионный обмен проводился при температуре 380°C . Время ионного обмена – 3 часа. После окончания ионного обмена проводилась обрезка и полировка торцов стеклянной подложки. Оптическое излучение осветителя микроскопа фокусировалось на входном канале разветвителя, а оптическое излучение, выходящее из четырех каналов разветвителя, наблюдалось под микроскопом. Внешний вид выходного излучения интегрально-оптического разветвителя 1×4 представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что выходные торцы разветвителя имеют круглую форму. Проведенные измерения показали, что диаметр выходных каналов составляет 9 мкм. При общей длине разветвителя 14 мм вносимые потери составили менее 1,1 Дб, а неравномерность деления света по каналам – 0,3 дБ,

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-230392 p_a

Список литературы

1. Никитин В.А., Яковенко Н.А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: Из-во КубГУ, 2013.
2. Векшин М.М., Никитин В.А., Яковенко Н.А. Измерение оптических потерь в заглубленных Ag^+ -волноводах в стекле К-8 // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С.331–332.

А.В. КНЯЗЬКОВ, С.А. СМУРОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ В ПОПЕРЕЧНОЙ ЯЧЕЙКЕ С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Приведены результаты экспериментального исследования распределения электрооптических свойств кристаллов LiNbO_3 , SBN и ЦТСЛ-керамики. Использовался гармонический анализ отраженного лазерного света. Свет отражался от передней грани поперечной ячейки электрооптического модулятора в переменном поле. Рассмотрены ячейки плоского и планарного конденсаторов. Оценена однородность электрооптической модуляции.

A.V. KNIAZKOV, S.A. SMUROV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

THE STUDY OF THE SURFACE DISTRIBUTION OF THE ELECTROOPTICAL PROPERTIES OF THE MEDIUM IN A TRANSVERSE CELL BY USING REFLECTED LIGHT

The results of experimental studies of the electrooptic properties distribution of crystals LiNbO_3 , SBN and PLZT-ceramics are presented. The harmonic analysis of the reflected laser light was used. The light was reflected from the front face of the electro-optical modulator transverse cell in AC field. The cells of flat and planar capacitors are considered. The homogeneity of electro-optical modulation is estimated.

Электрооптические (ЭО) среды предоставляют неограниченные возможности для ввода и обработки информации световым потоком. Однако при изготовлении этих сред, вследствие флуктуаций температуры и термических напряжений появляются неоднородности ЭО свойств [1]. Для наблюдения сложной картины оптических неоднородностей обычно используется пропускающий поляризационно-оптический метод [2].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование поверхностных ЭО характеристик наиболее популярных кристаллов LiNbO_3 , SBN и PLZT-керамики по модулированному отражению лазерного света [3]. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Излучение полупроводникового лазера ($\lambda = 650$ нм) фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 100 мм на поверхность ЭО образца в область между электродами.

В образцах создавалось переменное поле $E(f)$ частоты f , модулирующее отраженное излучение, которое фокусировалось на фотоприемнике. Переменный сигнал фотоприемника, пропорциональный линейному $r(x)$ или квадратичному $R(x)$ ЭО коэффициентам, усиливался резонансным услителем на первой (f) или второй ($2f$) гармонике (линейный или квадратичный ЭО эффект). Изменение коэффициента отражения $\Delta\rho(x)_r$ в линейных средах определяется выражением:

$$\Delta\rho(x)_r = \frac{\Delta I(x)\rho}{I_0} = \frac{\Delta\rho(x)}{\Delta n} \Delta n(x)_r = 2 \frac{n(x)-1}{(n(x)+1)^3} n(x)^3 r(x) E(f).$$

В средах с квадратичным ЭО эффектом $\Delta\rho(x)_R \sim R(x)E(2f)^2$.

Распределение амплитуды модуляции коэффициента отражения является критерием однородности поверхностных ЭО характеристик среды.

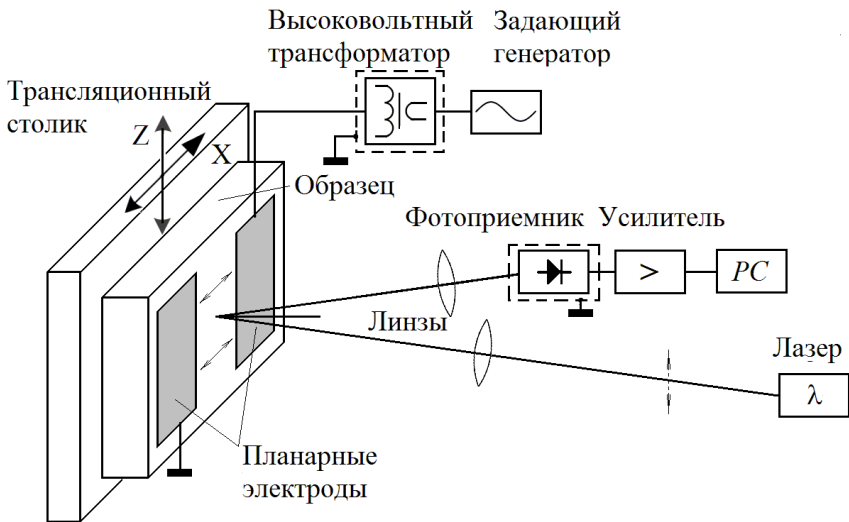


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987.
2. Братищенко Е.И., Педько Б.Б. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т.48. №6. С.1213.
3. Князьков А.В. // Оптика и спектроскопия. 2015. Т.118. №2. С.269-272.

В.В. КАРАНСКИЙ, С.В. СМИРНОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ
МОДУЛЯТОРОВ ИЗ Mn-Zn ФЕРРИТОВ С ПОМОЩЬЮ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ**

Приведены результаты экспериментов по планаризации поверхности оптических модуляторов с малым коэффициентом рассеяния с помощью электронно-лучевой обработки.

V.V. KARANSKY, S.V. SMIRNOV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**PLANARIZATION OF THE SURFACE OF OPTICAL
MODULATORS FROM Mn-Zn FERRITES WITH THE AID
OF ELECTRON-BEAM MACHINING**

The results of experiments on the planarization of the surface of optical modulators with a small scattering coefficient with the aid of electron-beam machining are presented.

Развитие современной электроники и наноэлектроники, спинтроники, фотоники в первую очередь связано с получением новых типов магнитных материалов. Марганец-цинковые ферриты используются в современных электронных компонентах, таких как записывающие головки, фильтры, оптические модуляторы, переключающие трансформаторы питания и др. [1, 2]. Однако, использование ферритов в производстве приборов фотоники накладывает ряд требований, предъявляемых к поверхности. Характерная шероховатость и наличие большого количества межзеренных границ и пор, приводят к увеличению коэффициента рассеяния света. Планаризация поверхности приводит к улучшению оптических свойств.

Целью работы является уменьшение коэффициента рассеяний света за счет планаризации поверхности с помощью обработки низкоэнергетическим электронным пучком. На рис.1 представлены микрофотографии поверхности марганец-цинкового феррита. На рис. 1а представлена исходная микроструктура поверхности Mn-Zn. Поверхность характеризуется большим количеством межзеренные границы и пор.

Подобная морфология поверхности оказывает отрицательное влияние на оптические свойства ферритовых изделий.

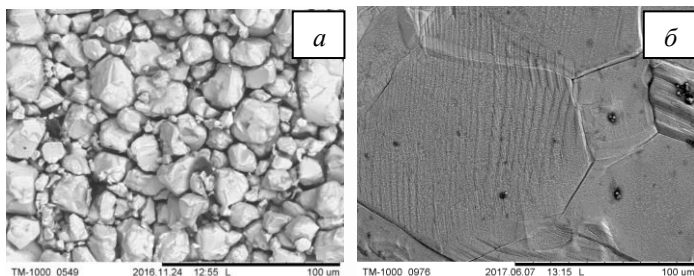


Рис. 1. Микроструктура поверхности марганец-цинковых ферритов: до обработки (а); после электронно-лучевой обработки (б)

На рис. 1б представлена микроструктура поверхности Mn-Zn феррита после электронно-лучевой обработки низкоэнергетическим пучком с плотностью мощности 810 Вт/см^2 . Поверхность характеризуется ростом зерен и планаризацией рельефа. На рис. 2 представлены Фурье-спектры Mn-Zn феррита.

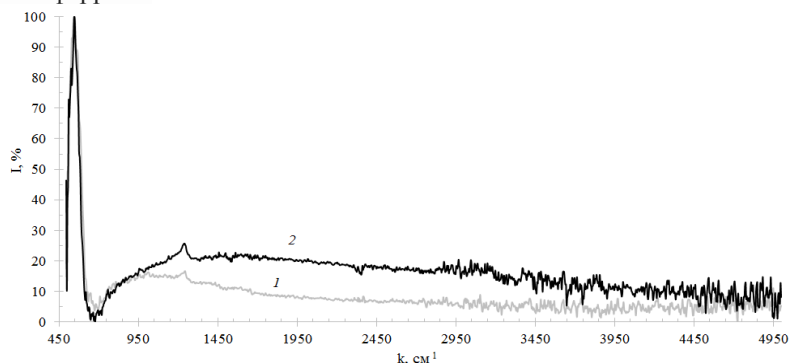


Рис. 2. Фурье-спектры: до обработки (1); после электронно-лучевой обработки (2)

Из Фурье-спектров отражения видно, что планаризация поверхности приводит к увеличению коэффициента отражения, за счет уменьшения рассеяний света.

Список литературы

1. Nakamura T., Okano Y. // Journal de Physique IV Colloque. 1997. P.C1-101-C1-102.
2. Mitrovic N.S., Djukic S.R., et. al. // Science of Sintering. 2012. P.355-364.

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА МОДОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО АСИММЕТРИЧНОГО Y-РАЗВЕТВИТЕЛЯ В СТЕКЛЕ

Разработан интегрально-оптический мультиплексор волноводных мод TE_0 и TE_1 на основе асимметричного Y-разветвителя в стекле. Разработка проведена для технологии формирования волноводов методом ионного обмена в стекле.

M.M. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF MODE MULTIPLEXER BASED ON THE INTEGRATED-OPTIC ASYMMETRIC Y-COUPLER IN GLASS

The integrated-optic TE_0 - and TE_1 -mode multiplexer, based on asymmetric Y-splitter in glass, has been designed. The multiplexer design has been made for waveguide fabrication technology by ion exchange in glass.

Цель настоящей работы состоит в разработке модового мультиплексора/демультиплексора мод TE_0 и TE_1 на основе Y-разветвителя в стекле.

На рис. 1 представлена схема интегрально-оптического модового мультиплексора. Мультиплексор состоит из трех частей: входной части разветвителя - волновода 1 и двух выходных плеч – волноводов 2 и 3.

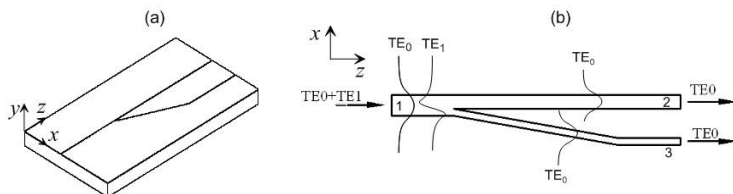


Рис. 1. Волноводный асимметричный Y-разветвитель: схематический трехмерный вид (а) и топология волноводной структуры модового мультиплексора (б)

Для построения модового мультиплексора необходимо, чтобы, во-первых, волновод 1 поддерживал распространение двух волноводных мод. Во-вторых, волноводное плечо 3 должно иметь эффективный показатель преломления моды TE_0 , максимально близкий к эффективному показателю преломления моды TE_1 входного канала 1; плечо 2 должно иметь эффективный показатель преломления моды TE_0 , близкий к эффективному показателю преломления моды TE_0 канала 1. В-третьих, эффективные показатели преломления моды TE_0 плеч 2 и 3 должны быть разнесены.

Для создания модового мультиплексора использована технология изготовления элементов интегральной оптики методом ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в стекле К-8. Путем решения уравнения диффузии и волнового уравнения, определяющих оптические характеристики волноводов Y-разветвителя, установлены параметры, необходимые для изготовления мультиплексора на рабочей длине волны 0.85 мкм: при ширине щелей в маске для плеч разветвителя 2 и 3, равной 6.8 и 2 мкм, ионный обмен должен проводиться в течение 2 часов. Используются следующие данные для расчетов: максимальное приращение показателя преломления волноводов $\Delta n = 0.0072$, коэффициент диффузии калия $D_K = 2.2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 2 показаны картины распространения TE_0 - и TE_1 -моды в Y-разветвителе. Расчет выполнен методом распространяющегося пучка.

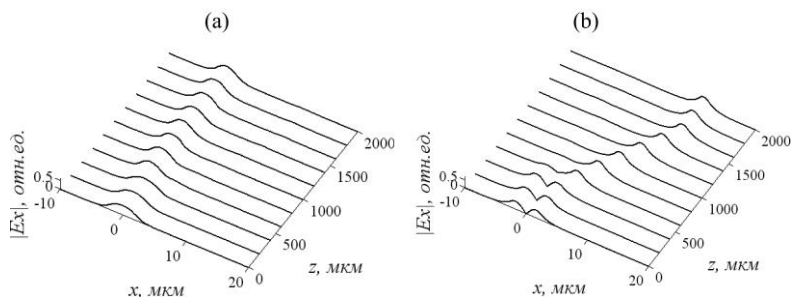


Рис. 2. Картина распространения мод TE_0 и TE_1 в асимметричном Y-разветвителе, (а) и (б) соответственно

Как видно из графиков, Y-разветвитель с подобранными в ходе расчетов параметрами выполняет запланированную функцию демультиплексора. Моды TE_0 и TE_1 разделяются по различным выходным каналам, при этом мода TE_1 трансформируется в моду TE_0 .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-48-230392 p_a.

П.А. НИКИТИН

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова***ОБРАТНАЯ КОЛЛИНЕАРНАЯ ДИФРАКЦИЯ
ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приведены результаты численного исследования зависимости интенсивности дифрагированного излучения и полосы акустооптического взаимодействия от величины полосы лазерного излучения в режиме высокочастотной коллинеарной дифракции. Моделирование проводилось с учётом поглощения излучения и затухания звука.

P.A. NIKITIN

*Lomonosov Moscow State University***BACKWARD COLLINEAR DIFFRACTION
OF BROADBAND RADIATION**

Presents the result of numerical experiment on the dependence of diffracted radiation intensity and bandwidth of acousto-optic interaction on the laser linewidth under high-frequency collinear regime. The model takes into account radiation absorption and sound attenuation.

Как известно, при малой эффективности акустооптической (АО) дифракции интенсивность излучения в минус первом дифракционном порядке определяется следующим выражением (в котором опущен множитель q^2L^2 , пропорциональный мощности акустической волны) [1]:

$$I_{-1}(Z_l, Z_s) \propto I_0(Z_l) \frac{1}{4(XW^2 + Z^2)} [1 + \exp(-2XW) - 2\exp(-XW)\cos(Z)]; \quad (1)$$

где использованы следующие безразмерные параметры:

$$Z = \eta L = 2Z_l - Z_s; \quad XW = (\alpha + \alpha_s / 2)L. \quad (2)$$

В соотношении (2) под L понимается длина АО взаимодействия, α – коэффициент поглощения излучения, α_s – коэффициент затухания акустической волны, параметр Z_l характеризует величину безразмерной расстройки по свету, а Z_s – по звуку. При дифракции монохроматического излучения полоса АО взаимодействия по звуку составляет величину $\Delta Z_s = \sqrt[4]{XW^4 + (0.88\pi)^4}$ [2].

При анализе предполагалось, что спектр падающего на АО ячейку излучения имеет прямоугольную форму:

$$I_0(Z_l) = \begin{cases} 1/(2\Delta Z_l^{(0)}); & |Z_l| \leq \Delta Z_l^{(0)} \\ 0; & |Z_l| > \Delta Z_l^{(0)} \end{cases} \quad (3)$$

Если акустическая волна является монохроматической и её частота удовлетворяет условию синхронизма $Z_s = 0$, то интенсивность дифрагированного излучения определяется следующим интегралом (рис. 1):

$$I_{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{-1}(Z_l, 0) dZ_l \quad (4)$$

Моделирование показало, что при $Z_l^{(0)} \gg \pi$ полоса АО взаимодействия по звуку ΔZ_s примерно равна ширине полосы лазерного излучения (рис. 2).

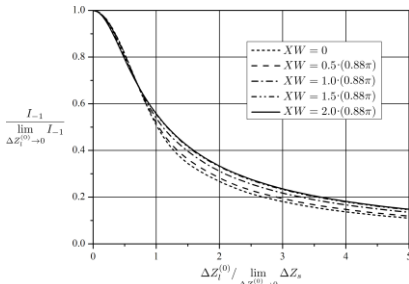


Рис. 1. Зависимость нормированной эффективности дифракции от ширины полосы излучения

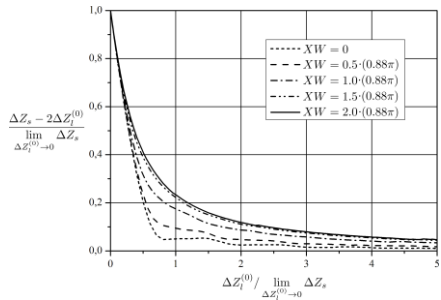


Рис. 2. Зависимость нормированной полосы АО взаимодействия от ширины полосы излучения

Таким образом, установлено качественное и количественное влияние немонахроматичности лазерного излучения на параметры обратной АО дифракции. Результаты работы могут быть использованы для проектирования АО устройств, работающих в режиме обратной коллинеарной дифракции.

Список литературы

1. Nikitin P.A., Voloshinov V.B., et al. // Physics Procedia. 2015. N70. P.712.
2. Никитин П.А., Волошинов В.Б. // Уч. зап. физ.факультета МГУ. 2016. №6. С.166601.

В.В. ПРОКЛОВ, Ю.Г. РЕЗВОВ¹

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

*¹Новомосковский институт Российского химико-технологического университета
им. Д.И. Менделеева, Тульская обл.*

ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ В МНОГОЧАСТОТНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ФИЛЬТРЕ

Построена теория акустооптической фильтрации на основе брэгговской дифракции плоской световой волны в ближнем поле излучения акустического преобразователя, возбуждаемого электрическим сигналом с дискретным частотным спектром. Рассмотрены приближенные решения задачи – при большом и малом расстояниях между соседними дискретными полосами пропускания многополосного фильтра (МАОФ) по сравнению с одночастотным фильтром. На частных примерах выполнено сравнительное исследование динамической функций пропускания МАОФ аналитическим методом и численным расчетом, которое показало удовлетворительное согласие двух подходов. На базе развитой теории обнаружены важные особенности формирования динамической функции многополосного пропускания МАОФ с использованием многочастотного возбуждения звука.

V.V. PROKLOV, Yu.G. REZVOV¹

*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS
¹Novomoskovsk Institute of Mendeleev University of Chemical Technology, Tula region*

DIFFRACTION OF A PLANE LIGHT WAVE IN THE ACOUSTO-OPTIC MULTI-FREQUENCY FILTER

A theory of acousto-optical filtration based on the Bragg diffraction of a plane light wave in a near field of radiation from an acoustic transducer excited by an electrical signal with a discrete frequency spectrum is developed. Approximate solutions of the problem are considered - for large and small distances between adjacent discrete bands of the multiband filter (MAOF) in comparison with a single-frequency filter. On particular examples, a comparative study of the dynamic transmission functions of MAOF by an analytical method and numerical calculation was carried out, which showed a satisfactory agreement of the two approaches. On the basis of the developed theory, important features of the formation of the dynamic function of the MAOF multiband transmission with the use of multi-frequency excitation of sound were discovered.

Многополосный акустооптический фильтр (МАОФ) выделяет из падающего широкополосного электромагнитного излучения дискретный ряд отдельных узких полос пропускания, ширина и местоположение которых определяется геометрией АО взаимодействия и частотным составом акустического потока. В настоящее время использование МАОФ представляется актуальным в целом ряде сформировавшихся прикладных направлений, таких как многоканальная волоконно-оптическая связь (в том числе, в некогерентных высоко производительных оптических системах передачи данных с кодовым разделением каналов), в гиперспектральных датчиках оптического дистанционного зондирования Земли и др. Однако, до сих пор недостаточно изучены многие теоретические аспекты работы МАОФ, существенные для перспективных применений. В данной работе использовано достаточно простое плосковолновое приближение, применимое в ближнем поле плоского акустического преобразователя.

При указанных условиях задача сводится к решению системы уравнений, описывающих поведение нулевого и первого дифракционных порядков. В работе методом последовательных приближений получены аналитические решения поставленной задачи для двух важных вариантов функционирования МАОФ. Первый вариант характеризуется невысоким уровнем дифракционной эффективности и не имеет ограничений на спектральный состав акустического сигнала. Второй вариант применяется при не очень больших межканальных искажениях, но не имеет ограничений по уровню дифракционной эффективности. Развитое аналитическое описание функционирования МАОФ удовлетворительно согласуется с имеющимися по этой теме экспериментальными результатами.

Таким образом, результаты проделанной работы вместе с недавними публикациями [1-4] вносят существенный вклад в анализ различных аспектов многополосной АО фильтрации в широком диапазоне длин волн излучения.

Список литературы

1. Проклов В.В., Бышевский-Конопко О.А., Филатов А.Л. // ЖТФ. 2015. Т.41. №20. С.37-43.
2. Proklov V.V., Byshevski-Konopko O.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012060.
3. Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Тр. 10-ой межд. конф. ARMIMP-2017. Суздаль, 2017. С.128-131.
4. Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Опт/и спектр. 2018. Т.124. №1. С.122.

Н.И. ПЕТРОВ, В.А. ДАНИЛОВ, В.В. ПОПОВ¹, Б.А. УСИЕВИЧ²
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва
¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА СУБВОЛНОВЫМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследована дифракция света субволновой металлической решеткой. Показано, что при определенных условиях возникает эффект плазмонного резонанса, при котором имеет место полное поглощение падающего излучения.

N.I. PETROV, V.A. DANILOV¹, V.V. POPOV¹, B.A. USIEVICH²
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow
¹*Lomonosov Moscow State University*
²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

RESONANCE ABSORPTION OF LIGHT BY SUBWAVELENGTH DIFFRACTIVE GRATINGS

In the present work diffraction of light by sub-wavelength metal grating is investigated theoretically and experimentally. It is shown that under certain conditions an effect of plasmon resonance occurs, at which there is a complete absorption of the incident radiation.

Для широкополосных высокоотражающих применений при фильтрации излучения обычно используются распределенные брэгговские многослойные диэлектрические отражатели. Представляют также интерес плазмонные поглощающие металлодиэлектрические структуры для частотно-селективных и широкополосных поглотителей. Такие структуры для полного поглощения излучения в далекой ИК-области рассматривались в [1].

В настоящей работе показано, что эффект полного поглощения можно наблюдать в металлической субволновой решетке и для излучения в видимом диапазоне спектра. Такие оптические элементы могут использоваться для обработки изображения в изображающих системах, проекционных дисплеях [2], и т.д. Рассчитаны дифракционные эффективности решеток из различных металлов (*Ni*, *Ag*, *Al* и др.) с

различными глубинами профиля и проведены измерения. Получено хорошее согласие результатов измерений с расчетами.

На рис. 1 представлены дифракционные эффективности в разных порядках серебряной (а, б) и никелевой (с, д) синусоидальной решеток с периодом $\Lambda = 400$ нм в зависимости от угла падения излучения ТМ поляризации с длиной волны $\lambda = 632$ нм при различных значениях глубины микрорельефа. Видно, что при глубине рельефа $h = 20$ нм практически 100% падающей энергии поглощается решеткой из серебра.

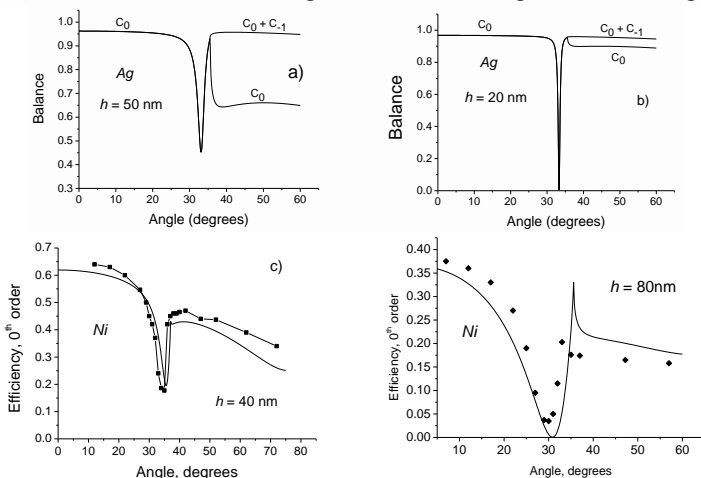


Рис. 1. Дифракционные эффективности синусоидальной решетки из серебра (а, б) и из никеля (с, д – теория и эксперимент) с периодом $\Lambda = 400$ нм в зависимости от угла падения излучения, сплошные линии – теория

Таким образом, при плазмонном резонансе возможно нахождение оптимальных параметров решетки (материал, глубина) и излучения (угол падения, поляризация), при которых отраженный и дифрагированный свет полностью отсутствуют, т.е. имеет место 100 %-е поглощение энергии падающего излучения металлической субволновой решеткой. Это свойство может быть использовано при разработке различных устройств, в частности, в солнечных батареях и дисплеях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-19-01461).

Список литературы

1. Vial B., Demesy G, Zolla F., et.al. // JOSA B. 2014. V.31. P.1339-1346.
2. Petrov N.I., Nikitin V.G., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Applied Optics. 2014. V.53. P.5740-5744.

О.А. БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО¹, В.В. ПРОКЛОВ¹,
Д.Ю. ВЕЛИКОВСКИЙ^{1,2}, А.В. КАРАНДИН²

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ИХ АПРИОРНО ИЗВЕСТНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ НА БАЗЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОПОЛОСНОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Работа является развитием одного из недавно предложенных новых подходов [1] к решению задачи дистанционного распознавания сигналов по их априорно известным спектральным признакам на базе использования метода многополосной акустooптической фильтрации (МАОФ) [2], основная цель которой - проведение первой экспериментальной проверки его работоспособности на некоторых примерах частных ситуаций с объектами из известной библиотеки эталонных спектров [3]. Получены первые результаты работы новой экспериментально-вычислительной методики в части вероятности достижения правильной идентификации оптического сигнала, возникающего при отражении света от одного из множества возможных объектов.

О.А. BYSHEVSKI-KONOPKO¹, V.V. PROKLOV¹,
D. Yu. VELIKOVSKII^{1,2}, A.V. KARANDIN²

¹*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

²*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow*

RESEARCH OF THE METHOD OF THE DISTANT RECOGNITION OF OPTICAL SIGNALS ON THEIR A PRIORI KNOWN SPECTRAL SIGNS ON THE BASIS OF MULTIBAND ACOUSTO-OPTICAL FILTRATION OF RADIATION

This work is the development of one of the recently proposed new approaches [1] to the solution of the problem of remote signal recognition by their a priori known spectral characteristics based on the use of the method of multi-band acousto-optic filtering (MAOF) [2], the main purpose of which is the first experimental verification of its operability for some examples of particular situations with objects from the known library of reference spectra [3]. The first results of the new experimental computational technique are obtained in terms of the probability of achieving the correct identification

of the optical signal that occurs when light is reflected from one of a variety of possible objects.

В работе была использована одноканальная схема [4] с одним широкополосным источником некогерентного излучения (LED), свет которого последовательно претерпевает АО дифракцию в двух фильтрах (МАОФ-1 и МАОФ-2), после чего выходная мощность $I_{\text{вых}}$ регистрируется на выходе фотодетектора (ФД). Входное широкополосное излучение светодиода (LED) с помощью двух управляющих (синтезируемых) электрических сигналов, подаваемых по очереди в МАОФ-1, обеспечивали на выходе два необходимых “эталонных оптических сигнала” с достаточно различающимися опорными функциями $F_1(\lambda_i)$ и $F_2(\lambda_i)$. Далее, такие сигналы по очереди проходят через МАОФ-2, где, также по очереди, формируются две спектральные функции пропускания, одна из которых в соответствии с предполагаемой обстановкой на входе (доля площади в пикселе, занимаемая “i-тым” типом объекта $k^{(i)}_1$ и фоном k_2) имитирует при заданной обстановке, соответственно, парциальные части сигналов от объекта и фона. Можно показать, что предложенные эксперименты позволяют осуществить для “i-того” объекта (с известными Ra_n^i и $k^{(i)}_1$) как расчет правой части системы (1), так и получить измеренные значения левой части:

$$\begin{aligned} I^{(i)}_1 &= (I^{(i)}_{11} + I^{(i)}_{12}) = k^{(i)}_1 \sum R a_n^i F_n^{(1)} + k^{(i)}_2 \sum R_{bn} F_n^{(1)} \\ I^{(i)}_2 &= (I^{(i)}_{21} + I^{(i)}_{22}) = k^{(i)}_1 \sum R a_n^i F_n^{(2)} + k^{(i)}_2 \sum R_{bn} F_n^{(2)} \end{aligned} \quad (1)$$

Концепция нового метода предполагает, что при достаточно высокой точности измерений и достаточном различии коэффициентов отражения в спектрах отражений объектов рассматриваемого семейства, система уравнений (1) для любой ситуации на входе дает свою пару $k^{(i)}_1$ и $k^{(i)}_2$, из которых решению задачи, как правило, удовлетворяет только та, для которой $k^{(i)}_1 + k^{(i)}_2 = 1$. Будут представлены результаты экспериментально-вычислительной работы с использованием современных МАОФ на основе кристаллов парателлурита, которые, в целом, удовлетворительно согласуются с изменяемыми входными условиями.

Работа поддержана грантом РФФИ №16-02-00124-А.

Список литературы

1. Бышевский-Конопко О.А., Проклов В.В. и др. // VI Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С.608.
2. Проклов В.В., Бышевский-Конопко О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т.41(20). С.37.
3. USGS Digital Spectral Library 06 // <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/>.
4. Великовский Д.Ю. и др. // Материалы 10-й Межд. науч.-техн. конф. “Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации”. Суздаль, 2017. С.253.

Т.В. ЯКОВЛЕВА

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
Москва*

НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ РАЙСОВСКИХ ДАННЫХ КАК ОСНОВА НОВОГО ПОДХОДА К ИЗМЕРЕНИЮ ФАЗОВОГО СДВИГА СИГНАЛОВ

Развивается новый теоретический метод решения задачи высокоточного измерения фазового сдвига между двумя квазигармоническими сигналами. Искомые фазовые характеристики определяются в результате проведения лишь амплитудных измерений, что означает существенное снижение технических требований к используемому оборудованию и упрощает практическое применение метода.

T.V. YAKOVLEVA

Federal Research Center «Computer Science and Control» of the RAS, Moscow

NONLINER FILTRATION OF RICIAN DATA AS A BASIS FOR A NEW APPROACH TO MEASURING THE SIGNALS' PHASE SHIFT

A new theoretical method is developed for solving the task of high-precision measuring the phase shift between two quasi-harmonic signals. The sought-for phase characteristics are determined as a result of conducting the amplitudes' measurements only what means a significant decrease in the technical requirements to the equipment and simplifies the application of the proposed technique in practice.

Проблема высокоточного измерения разности фаз двух сигналов в режиме реального времени является важной для решения задач в различных областях науки и техники, таких как оптика, фотоника, радиофизика, в частности – при определении расстояний и геометрических параметров объектов в оптической метрологии, при решении задач неразрушающего контроля и т.д. [1].

Цель настоящей работы состоит в развитии принципиально нового подхода к фазовым измерениям, основанного на статистической обработке величины амплитуды сигнала. В работе развита теория и дано математическое обоснование предлагаемого метода, основанного на особенностях статистического распределения Райса.

Как известно, неизбежное воздействие шума на процесс распространения любого исходно гармонического сигнала приводит к случайным флуктуациям величины амплитуды сигнала, и вместо гармонического сигнала следует рассматривать квазигармонический сигнал, который в комплексной плоскости можно представить следующим образом: $S(t) = R(t) \cdot \exp[i\omega t + i\varphi(t)]$, где ω - частота, $R(t)$ - амплитуда, или огибающая сигнала, $\varphi(t)$ - величина фазового сдвига, $R(t)$ и $\varphi(t)$ изменяются со временем t случайным образом под воздействием гауссовского шума. Можно показать, что амплитуда R результирующего сигнала удовлетворяет распределению Райса с параметрами A, σ^2 , совпадающими с величиной амплитуды исходного сигнала A и дисперсией искажающего его гауссовского шума σ^2 , [2].

Решая задачу измерения фазового сдвига между двумя квазигармоническими сигналами, представим эти сигналы в виде векторов и рассмотрим третий сигнал, равный сумме этих двух сигналов. Очевидно, что «медленные» составляющие трех сигналов формируют треугольник, а искомая разность фаз может быть рассчитана как функция сторон этого треугольника, т.е. величин амплитуд трех сигналов. Однако, флуктуации амплитуд сигналов под влиянием шума не позволят точно определить искомую разность фаз, поэтому важно «восстановить» не искаженные шумом значения амплитуд, которые совпадают с райсовскими параметрами соответствующего сигнала. Возможность восстановления неискаженных амплитуд обеспечивается методами двухпараметрического анализа райсовских данных, [3]. Искомая разность фаз вычисляется как угол треугольника, формируемого не искаженными величинами амплитуд трех анализируемых сигналов. Эффективность метода подтверждается результатами численного эксперимента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00064.

Список литературы

1. Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays / J. G. Webster (Ed.). Boca Raton: CRC Press, 2004.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику ч.1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
3. Yakovleva T.V., Kulberg N.S. Noise and Signal Estimation in MRI: Two-Parametric Analysis of Rice-Distributed Data by Means of the Maximum Likelihood Approach // American Journal of Theoretical and Applied Statistics. 2013. V.2(3). P.67-79.

Я.Е. АКИМОВА, Ю.А. ЕГОРОВ

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь***ИЗМЕРЕНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА ПУЧКОВ С ДРОБНЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ**

На данном момент, с развитием сингулярной оптики, отмечается интенсивный всплеск интереса к вихрям переносящим дробный топологический заряд. Вихри подобного рода впервые были созданы Соскиным за счет компьютерно-синтезированной голограммы. Установлено, что подобные пучки имеют С-образную форму и за счет различных манипуляций распадаются на бесконечное множество вихрей с целочисленным зарядом. Таким образом, становится актуальным, использование подобных пучков при кодировании информации в волоконно-оптических линиях связи.

Ya.E. AKIMOVA, Yu.A. EGOROV

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol***MEASUREMENT OF ORBITAL ANGULAR MOMENTUM BEAMS WITH FRACTIONAL TOPOLOGICAL CHARGE**

At this moment, with the development of singular optics, it is noted an intense surge of interest in vortices carrying fractional topological charge. Vortices of this kind was first created by Soskin through computer-synthesized hologram. It is established that such beams have C-shaped and by means of various manipulations disintegrate into an infinite number of vortices with integer charge. Thus, it becomes relevant the use of such beams by encoding information in fiber-optic communication lines.

Определение величины топологического заряда на данный момент является одним из самых важных вопросов в сингулярной оптике [1, 2]. Установлено, что пучки с дробным топологическим зарядом имеют С-образную форму и за счет различных манипуляций распадаются на бесконечное множество вихрей с целочисленным зарядом. В некоторых работах отмечается [3] необычное поведение орбитального углового момента (ОАМ). Если воспользоваться распределением Фурье, получим:

$$e^{ip\varphi} = \frac{e^{ip\pi} \sin(\pi p)}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{e^{im\varphi}}{p-m}$$

Параметр p - дробный топологический заряд, который отвечает за набор вихрей с целыми топологическими зарядами $m = -\infty \dots -1, 0, 1, \dots +\infty$ и спектральная плотность такого пучка принимает вид $\rho(p) = (p-m)^{-1}$. Значение величины топологического заряда также можно связать с орбитальным угловым моментом пучка $l_z \approx p$.

На рис. 1а приведено распределение интенсивности пучка, переносящего дробный топологический заряд, его интерференционная картина представлена на рис. 1б.

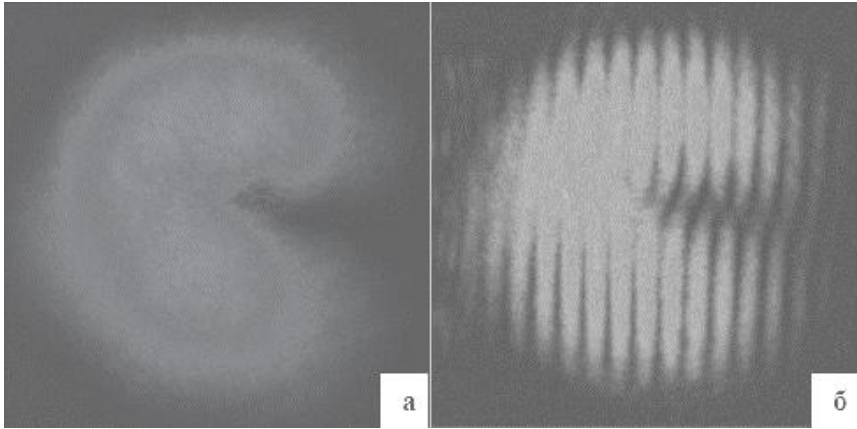


Рис. 1. Интенсивность пучка, переносящего дробный топологический заряд (а) и его интерференционная картина (б)

Список литературы

1. Котляр В.В., Ковалев А.А., Порфирьев А.П. Определение топологического заряда оптического вихря с помощью астигматического преобразования // Компьютерная оптика. 2016. Т.40. №6. С.781-792.
2. Vaity P, Banerji J, Singh RP. Measuring the topological charge of an optical vortex by using a tilted convex lens // Phys Lett A. 2013. V.377(15). P.1154-1156.
3. Fadeyeva T.A., Rubass A.F., Aleksandrov R.V., Volyar A.V. // J. Opt. Soc. Am. B. 2014. V.31. P.798.
4. Leach J., Yao E., Padgett M.J. // New J. Phys. 2004. V.6. P.71.
5. Maleshkov G., Neshev D., Dreischuh A. // Phys. Rev. A. 2009. V.80. P.053828.
6. Alexeyev C., et al. // Opt. Lett. 2017. V.42. №4. P.783.

А.Е. АГЕЕВ, С.Э. ДЖИОЕВ, Д.А. ИВАНОВ, Б.А. КУЗЯКОВ
Московский технологический университет (МИРЭА)

КОМБИНИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОРБИТАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ФОТОНОВ

Рассматривается оптическая комбинированная система связи с атмосферными сегментами. Для снижения влияния атмосферы, в методе коррекции фазы применяются орбитальные угловые моменты (ОАМ) фотонов. В модуле передатчика создается поток фотонов с определенной модой ОАМ, в приемном модуле выбираются фотоны с соответствующей модой ОАМ, что позволяет реализовать коррекцию системы связи.

А.Е. AGEEV, E.S. DZHIOEV, D.A. IVANOV, B.A. KUZYAKOV
Moscow Technological University (MIREA)

THE COMBINED OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM USING ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF PHOTONS

Discusses the combined optical communication system with atmospheric segments. To reduce the influence of the atmosphere, in the correction method of the phase-change of the orbital angular momentum (OAM) of photons. In the transmitter module generates a stream of photons with a certain fashion OAM, the receiving module is chosen cleared the photons with the corresponding mode of the OAM, allowing to realize the adjustment of the communication system.

Комбинированные системы (КТС) могут содержать [1-3] несколько сегментов волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и атмосферных открытых линий связи (АОЛС). В последних, передача информации осуществляется в открытом пространстве лазерным лучом в условиях прямой видимости. При решении задачи повышения эффективности канала связи, нужен синтез КТС. Для снижения влияния атмосферных явлений на канал передачи информации применяются несколько методов. В методе коррекции фазы (МКФ) на основе применения орбитальных угловых моментов (рис. 1) фотонов (ОАМ состояний), как показано в [4] достигнут значительный прогресс. На рис. 1 представлены зависимости BER в системе с мультиплексированием, для разных мод ОАМ фотонов (параметр l). Например, видно, что величины BER могут быть ниже 10^{-5}

при высоком уровне турбулентности ($C_n^2 \sim 10^{-14}$), причем, реализуется значимый контраст между ближними модами ОАМ.

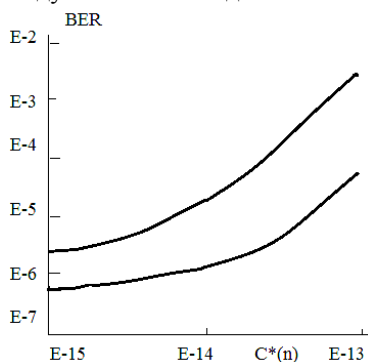


Рис. 1. Зависимости величины BER от уровня турбулентности $C^*(n) \equiv C_n^2 (m^{-2/3})$ при 2-х модах ОАМ: верхняя - $l=5$, нижняя - $l=2$

Для реализации методики с использованием мод ОАМ могут применяться несколько вариантов схем: использование отражательных голограмм [1]; применение магнито-оптического эффекта [5]; электрический контроль ОАМ при фокусировке лазерного пучка на кристалл [6].

В заключение можно отметить, что метод использования состояний орбитального углового момента фотонов обладает существенным преимуществом в сравнении с другими рассмотренными методами.

Список литературы

1. Gibson G., Courtial J., Padgett M., Vasnetsov M., Pas'ko V., Barnett S., Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // Optics Express. 2004. V.12. Is.22. P.5448-5456.
2. Павлов Н.М. Коэффициент готовности атмосферного канала АОЛП и методы его определения // Фотон-Экспресс. 2006. №6. С.78-90.
3. Кузяков Б.А., Кириллова Ю.А. Оценки дисперсии флуктуации интенсивности лазерных пучков в турбулентной атмосфере // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С.211-212.
4. Yang C., Xu C., Ni W., Gan Y., Hou J., Chen S. Turbulence heterodyne coherent mitigation of orbital angular momentum multiplexing in a free-space optical link by auxiliary light // Optics Express. 2017. V.25. Is.21. P.25612-25624.
5. Yang M., Li T.-F., Sheng Q.-W., Guo T.-J., Guo Q.-H., Cui H.-X., Chen J. Manipulation of dark photonic angular momentum states via magneto-optical effect for tunable slow-light performance // Optics Express. 2013. V.21. Is.21. P.25035-25044.
6. Zhu Cr.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.

П.А. ЧАЙМАРДАНОВ

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

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

В данной работе предложен прототип разрабатываемого программного обеспечения, предназначенного для имитационного моделирования волоконно-оптических систем передачи. Прототип основан на моделях, представленных в литературе, а также результатах собственных исследований.

P.A. CHAYMARDANOV

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR COMPUTER MODELING OF FIBER OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS

A prototype of being developed software for simulating fiber optic transmission systems has been presented in this paper. The prototype is based on models, which have been presented in literature, and own research work.

В настоящее время на сетях связи широко используются волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). По сравнению с другими системами передачи ВОСП обладают самой широкой полосой пропускания, высокой надежностью и защищенностью, низкими потерями и длительным сроком эксплуатации. Данные преимущества определили использование ВОСП как на транспортных сетях, включая сети синхронной цифровой иерархии (SDH) и оптические транспортные сети (OTN) с использованием плотного и сверхплотного спектрального уплотнения (DWDM/HDWDM), так и на сетях доступа, где основными оптическими технологиями являются пассивная оптическая сеть (PON), и «волоконно до точки x» (FTTx).

Проектирование ВОСП подразумевает проведение предварительного имитационного моделирования с целью оптимизации ее технико-экономических характеристик. Неправильный выбор компонентной базы может привести к выбору неоптимальной, а иногда и неработоспособной схемы ВОСП.

Для проведения имитационного моделирования используют специализированные программные пакеты, такие как OptiSystem, OptiSim, VPITransmissionMaker, PHOTOSS и другие. Основными недостатками данных продуктов являются: высокая цена, сложность освоения, большое время расчета, отсутствие кроссплатформенности. Кроме того, будучи продуктами иностранного происхождения, они не учитывают используемую компонентную базу и специфику рынка в России.

На базе вышесказанного было принято решение о разработке собственного программного продукта, позволяющего производить имитационное моделирование ВОСП, в котором отсутствуют данные недостатки.

На основании предложенных в литературе моделей оптических и оптоэлектронных компонентов [1-4], а также собственных исследований [5], был разработан прототип будущего программного продукта.

Прототип позволяет:

- моделировать передающие оптические модули, формирующие сигналы с различными форматами модуляции, используемыми в современных ВОСП, включая амплитудные, фазовые и комбинированные форматы.

- моделировать процессы распространения сигналов в пассивных компонентах, телекоммуникационных волокнах, а также волокнах, легированных ионами эрбия (EDF) и усилителях на их основе (EDFA).

- импортировать исходные данные и экспортировать результаты расчета.

- производить работу под ОС семейства Windows, Linux, OS X.

По мнению автора, разрабатываемый программный продукт представляет интерес для компаний, занимающихся проектированием и разработкой новых ВОСП, отдельных компонентов ВОСП (например, волоконно-оптических усилителей), а также для научно-исследовательских и образовательных организаций.

Список литературы

1. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped fiber amplifiers. Fundamentals and Technology. Academic Press, 1997.
2. Desurvire E. Erbium-Doped fiber amplifiers. Principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 1994.
3. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, 2012.
4. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission. Springer, 2009.
5. Чаймарданов П.А., Былина М.С. Новая методика расчета оптического усилителя EDFA с многоканальными источниками сигналов и накачек // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т.10. №3. С.92–102.

С.С. ЛУТЧЕНКО, И.В. БОГАЧКОВ, Е.Ю. КОПЫТОВ
Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ВОЛС С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

В исследовании рассмотрен метод определения коэффициента готовности волоконно-оптической линии связи с учётом влияния натяжения оптического волокна и температурного воздействия. По допустимому значению коэффициента готовности можно определить предельную периодичность обслуживания ВОЛС.

S.S. LUTCHENKO, I.V. BOGACHKOV, E.YU. KOPYTOV
Omsk State Technical University

A DETERMINATION OF THE AVAILABILITY FACTOR OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES WITH CONSIDERATION OF INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

The method of determining the availability factor of FOCL with consideration of influence of the fiber strain and temperature effects is discussed. A periodicity of the FOCL service is determined by analysis of the allowable value of the availability factor.

Для обеспечения многолетней работы ВОЛС необходимо обеспечить отсутствие механических натяжений в оптическом волокне (ОВ). Даже незначительное натяжение ОВ (более 0,2 %) может привести к многократному уменьшению его срока службы, поэтому для оценки надёжности ВОЛС необходима информация о натяжении ОВ в кабеле.

В настоящее время недостаточно моделей оценки коэффициента готовности и определения сроков технического обслуживания (ТО) ВОЛС, в которых учтено влияние такого фактора, как растяжение.

Для получения математической модели выполнены следующие этапы:

1. Определены состояния ВОЛС.
2. Составлен граф состояний и переходов системы (рис. 1).

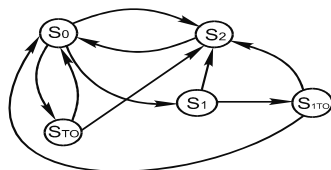


Рис. 1. Граф состояний системы

3. Определены переходы системы из S_i -го состояния в S_j -е, которые происходят в определенные моменты времени.

4. Для определения времени нахождения системы в рассматриваемых состояниях составлены матрица и система финальных вероятностей.

На рис. 1 обозначены состояния: S_0 – исправное состояние; S_1 – состояние при растяжении; S_2 – состояние явного отказа; S_{TO} – состояние технического обслуживания (ТО) исправной системы; S_{1TO} – состояние ТО системы при растяжении. Формула для расчета функционала $K_T(T)$ имеет вид:

$$K_T(T) = \frac{\pi_0(T)\omega_0(T) + \pi_1(T)\omega_1(T)}{\pi_0(T)v_0(T) + \pi_1(T)v_1(T) + \pi_2(T)v_2(T)}. \quad (1)$$

График результатов моделирования представлены на рис. 2.

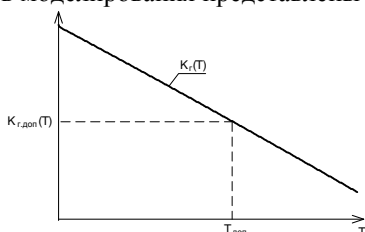


Рис. 2. График зависимости коэффициента готовности ВОЛС

Результаты моделирования оцениваются по значению $K_{T,доп}(T)$, которое соответствует периодичности технического обслуживания $T_{доп}$.

Модель учитывает механические и температурные воздействия на ВОЛС. Полученная оценка коэффициента готовности позволяет определить рекомендуемые сроки проведения профилактических работ с целью повышения эффективности эксплуатации ВОЛС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Богачков И.В. Исследования влияния существенных растягивающих сил, приложенным к оптическим волокнам, на спектр бриллюэновского рассеяния // Сб. трудов Межд. науч.-техн. конф. «Синхроинфо-2016», Самара. М.: Медиа Паблшер, 2016. С.136-139.
2. Майстренко В.А., Богачков И.В., Копытов Е.Ю. и др. Подход к расчету комплексных показателей надежности и периодичности технического обслуживания ВОЛС // Тр. XIII-ой Межд. науч.-техн. конф. IEEE АПЭП. Новосибирск, 2016. Т.7. С.73-78.
3. Лутченко С.С., Копытов Е.Ю., Богачков И.В. Оценка надежности ВОЛС с учетом влияния внешних факторов // Динамика систем, механизмов и машин: Мат. XI Межд. IEEE науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. Т.5. №4. С.34-39.

Е.В. БАРШАК, Д.В. ВИКУЛИН, М.А. ЯВОРСКИЙ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ГЕЙТ CNOT В МУЛЬТИ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

В работе предсказан эффект инверсии топологического заряда выходного оптического вихря, управляемой циркулярной поляризацией входного пучка, в мульти-эллиптических оптических волокнах. Это открывает возможность создания логического элемента CNOT на основе таких волокон.

E.V. BARSHAK, D.V. VIKULIN, M.A. YAVORSKY
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE CNOT GATE IN MULTI ELLIPTICAL OPTICAL FIBERS

It was demonstrated the inversion of topological charge of an output optical vortex controlled by circular polarization of an input vortex in multi-elliptical optical fibers. This opens the possibility of creating the logical element CNOT based on such fibers.

В настоящее время оптические вихри (ОВ) приобретают все большее значение в информационных технологиях, что связано с их способностью переносить орбитальный угловой момент (ОУМ) [1, 2]. Это открывает новые возможности передачи данных, а также ставит ряд задач, среди которых можно выделить проблему реализации базовых логических операций над значениями ОУМ. Так, для полноценного использования информационного потенциала состояний фотонов с ОУМ в области моделирования квантовых вычислений и коммуникаций требуется механизм генерации перепутанных состояний ОВ, а также осуществления базовых логических операций – гейтов. Таким образом, целью данной работы является демонстрация способности мульти эллиптических волокон (МЭВ) с крутильными механическими напряжениями (КМН) осуществлять управляемую поляризацией инверсию топологического заряда (ТЗ) ОВ, что позволяет реализовать один из ключевых логических гейтов CNOT. Модель МЭВ с КМН описывается следующим тензором диэлектрической проницаемости (рис. 1): $\hat{\varepsilon}_{\text{МЭВ}}(r, \varphi) = \varepsilon_{\text{ИВ}} r \hat{1} + \varepsilon_{\text{МЭВ}}(r, \varphi) \hat{1} + \hat{\varepsilon}_{\text{КМН}}(r, \varphi)$, где $\varepsilon_{\text{ИВ}}(r)$ – описывает идеальное волокно [3], $\varepsilon_{\text{МЭВ}}(r, \varphi, \tau)$ описывает анизотропию формы поперечного сечения [2] (τ – порядок симметрии поперечного сечения), а

$\hat{\varepsilon}_{\text{КМН}}(r, \varphi)$ вызван влиянием КМН через эффект фотоупругости [3]. Установленные выражения для мод вблизи определенных резонансных значений шага скрутки, $|\Psi_1\rangle = (\cos\alpha|-1, -m\rangle + \sin\alpha|-1, m\rangle)e^{i\beta_1 z}$, $|\Psi_2\rangle = (\sin\alpha|-1, -m\rangle - \cos\alpha|-1, m\rangle)e^{i\beta_2 z}$, где m – азимутальное число, α – параметр распределения энергии между парциальными вихрями в моде, β_1, β_2 – соответствующие постоянные распространения, позволяют аналитически исследовать эволюцию ОБ в таких волокнах. Анализ показывает, что при строгом попадании в резонансную точку на оптимальной длине волокна имеет место следующее преобразование входного ОБ: $|-1, \ell\rangle \rightarrow |-1, -\ell\rangle^{(*)}$, где $\ell = \pm m$ – ТЗ ОБ, тогда как $|1, m\rangle$ и $|1, -m\rangle$ с высокой степенью точности являются модами и поэтому не меняют своей структуры при распространении: $|1, \ell\rangle \rightarrow |1, \ell\rangle^{(**)}$.



Рис. 1. Модель МЭВ с КМН (порядок симметрии $\tau = 4$)

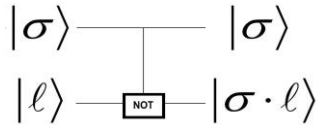


Рис. 2. Схема гейта CNOT: управляющий кубит – $\sigma = \pm 1$, управляемый – $\ell = \pm m$

Выражения (*) и (**) указывают на возможность управления знаком ТЗ выходного ОБ с помощью МЭВ с КМН путем управления знаком циркулярной поляризации входного ОБ $\sigma = \pm 1$, что демонстрирует теоретическую возможность создания фундаментального логического элемента – «Управляемое-НЕ» (CNOT gate), где роль управляющего кубита играет состояние циркулярной поляризации $\sigma = \pm 1$, а управляемого – ТЗ ОБ $\ell = \pm m$ (рис. 2). Важно отметить, что предложенный волоконный метод реализации гейта CNOT имеет существенные преимущества в виде «чистоты» волоконных полей, эффективности и устойчивости, способствуя дальнейшему расширению информационных возможностей, основанных на ОУМ-технологиях.

Список литературы

1. Padgett M. J. // Opt. Express. 2017. V.25. P.11265-11274.
2. Alexeyev C.N., Alexeyev A.N., et. al // Phys. Rev. A. 2013. V.88. P.063814.
3. Alexeyev C., Barshak E., et. al. // Appl. Opt. 2012. V.51. P.163-169.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Рассмотрены особенности спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптическом волокне, легированного эрбием, и оптоволокне, сохраняющем состояние поляризации. Показана связь между величиной бриллюэновского сдвига частоты с характеристиками сердечника оптического волокна.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

A STUDY OF THE MANDELSTAM – BRILLOUIN SCATTER CHARACTERISTICS IN SPECIALIZED OPTICAL FIBERS

The work is devoted to the researches of the Mandelstam – Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber and the polarization maintaining fiber. The value of Brillouin frequency shift depends on characteristics of the fiber core.

Для обнаружения участков волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с повышенным натяжением оптических волокон (ОВ) и изменённой температурой применяются бриллюэновские оптические импульсные рефлектометры (BOTDR) [1-3]. В BOTDR регистрируется и анализируется распределение спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) вдоль ОВ.

Поскольку при бриллюэновской рефлектометрии уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны, представляет особый интерес исследование СРМБ в ОВ с различными структурами сердечника ОВ.

Бриллюэновский сдвиг частоты (f_B) в ОВ определяется формулой

$$f_B = f_L - f_s = 2f_L v_A n / c = 2v_A n / \lambda_L. \quad (1)$$

где f_L – частота излучения лазера (λ_L – длина волны излучения лазера), f_s – частота стоксовой компоненты, c – скорость света в среде, n – показатель преломления сердцевин ОВ, v_A – скорость гиперакустической волны в ОВ:

$$v_A = \sqrt{\frac{\varepsilon_y (1 - \mu_p)}{\rho (1 + \mu_p) (1 - 2\mu_p)}}. \quad (2)$$

где ε_Y – модуль Юнга ОБ, μ_P – коэффициент Пуассона для ОБ, ρ – плотность сердечника ОБ. Если для плавленого кварца принять $\mu_P = 0,17...0,22$, то подстановка этих значений μ_P в (2) даёт формулу

$$v_A = (1,03...1,07)\sqrt{\varepsilon_Y / \rho}. \quad (3)$$

ОБ, легированное эрбием определенной концентрации, (EDF) применяется для построения эрбиевых оптических усилителей [2]. Мощность излучения накачки для EDF, используемого в эрбиевых усилителях, соизмерима с порогом проявления рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. ОБ, сохраняющее состояние поляризации вводимого излучения, («Panda») нашло применение в случаях, когда необходим контроль состояния поляризации, например, в волоконных гироскопах [3]. Поскольку EDF и ОБ «Panda» могут иметь существенные различия в поведении характеристик СРМБ, представляет особый интерес исследование этих характеристик при различных уровнях мощности вводимого сигнала и изменениях температуры.

На рис.1 приведены рефлектограммы профиля СРМБ EDF и зависимости потерь. Профиль СРМБ EDF имеет единственный максимум (f_B), однако он смещён на частоту 10,7 ГГц (у G.652 $f_B \approx 10,82$ ГГц).

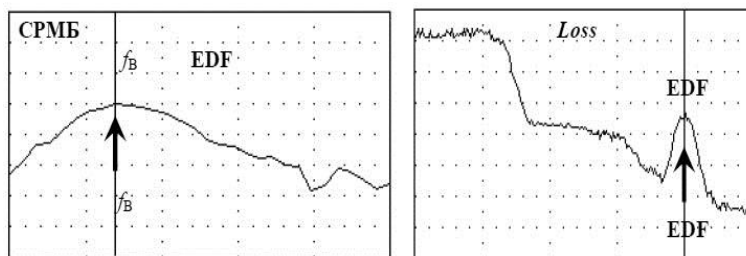


Рис. 1. Профиль СРМБ и график потерь EDF

Также на графике потерь хорошо заметен подъём примерно на 3 дБ, причём максимум совпадает с серединой EDF. Такие эффекты у ОБ других разновидностей не наблюдались. Профиль СРМБ ОБ «Panda» совпадает с профилем G.652, но при этом смещён на частоту 10,42 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Богачков И.В. // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т.10. №11. С.40-45.
2. Bogachkov I.V. // Т-сomm. 2017. V.11. No.6. P.59-63.
3. Kompaneets O.E., Bogachkov I.V., Trukhina A.I. // SINKHROINFO-2017. P.1-6.

К.В. ЗАИЧКО

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗАХ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты расчета оптического затухания при воздействии ионизирующего излучения различных доз на основе экспериментальных данных. Определены предельные значения факторов, которые воздействуют на оптическое волокно. Дана численная оценка пределов работоспособности оптического волокна.

K. V. ZAICHKO

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

MODELING OF THE OPTICAL FIBER ATTENUATION OF VERIOUS DOSES OF IONIZING RADIATION

The results of calculation of optical fiber attenuation under the action of ionizing radiation of different doses are presented on the basis of the experimental data given in the literature. The limiting values of the factors that affect the optical fiber are determined. The numerical estimation of the limits, operability of optical fiber is given.

Важнейшей характеристикой оптических волокон (ОВ), используемых в космических аппаратах (КА) с длительным сроком работы, являются оптические потери. Они определяют дальность связи по ОВ и его эффективность.

Цель работы – произвести численное моделирование влияния ионизирующего излучения на оптическое затухания ОВ.

Известна экспериментальная зависимость затухания α от поглощенной дозы ионизирующего излучения. Зависимость в графической форме представлена на рис. 1. Для определения величины затухания в ОВ при воздействии больших доз ионизирующего излучения (30, 300 и 600 Мрад), проведем аппроксимацию экспериментальных данных источника [1] выражением

$$\alpha = a_1 \cdot (1 - e^{-b_1 t}) + a_2 \cdot (1 - e^{-b_2 t}) - a_3 \cdot (1 - e^{-b_3 t}),$$

где $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ - коэффициенты аппроксимации, учитывающих три механизма радиационного наведенного поглощения.

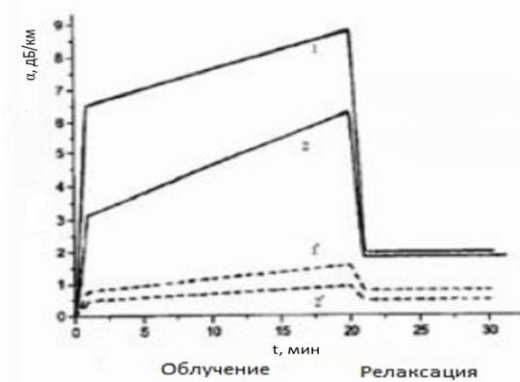


Рис. 1. Зависимость величины затухания от времени облучения [1]

Результат аппроксимации экспериментальных данных из [1] показан на рис. 2. Стоит отметить, что приведенные расчетные значения затухания получены для условий испытания ОВ в экспериментальной установке, аналогичной приведенной в [1]. В условиях космического пространства, согласно ГОСТ РВ 20.39.304-98, накапливаются в элементах КА в течение 25 лет его работы. Иллюстрация зависимости затухания от поглощенной дозы (в логарифмическом масштабе), приведена на рис. 3.

Оценка показывает, что при заданных дозах затухание в ОВ стационарно и составляет 9,329 дБ/км.

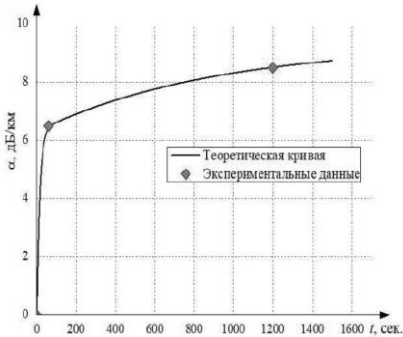


Рис. 2. Результат аппроксимации экспериментальных данных

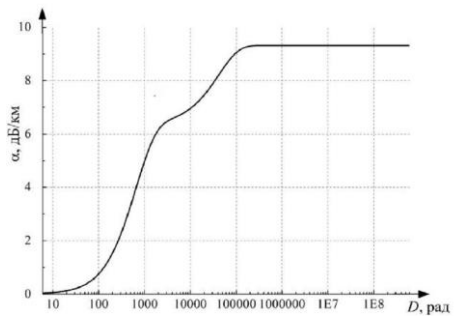


Рис. 3. Расчетные величины затухания от поглощенной дозы облучения

Список литературы

1. Долгов И.И., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной // Фотон-экспресс. 2005. №6. С.8-10.

Д.С. УКОЛОВ¹, М.Е. ЧЕРНЯК^{1,2}, Р.К. МОЖАЕВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ОДНОМОДОВОМ РАДИАЦИОННОСТОЙКОМ ФТОРОСОДЕРЖАЩЕМ ОПТОВОЛОКНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты исследования затухания оптического сигнала в радиационностойком оптоволокне после длительного воздействия гамма-излучения.

D.S. UKOLOV¹, M.E. CHERNIAK^{1,2}, R.K. MOZHAEV¹

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Specialized electronic systems, Moscow

STUDY OF GAMMA-RAY INDUCED ATTENUATION OF FLUORINE-DOPED SINGLE-MODE RADIATION HARD OPTIC FIBER

The paper presents the measurements results of optic fiber's radiation induced attenuation. The approach of optic fiber's radiation test at negative temperatures is introduced.

Увеличение объема передачи информации по каналам связи требует постоянного совершенствования соответствующих технических средств, среди которых важную роль играют волоконно-оптические линии связи. Оптоволокно обеспечивает надежную гальваническую развязку, безопасность и надежность передачи информации.

Для применения оптоволоконных линий связи на борту космических аппаратов важной задачей становится оценка радиационной стойкости волокна и определение затухания оптического сигнала от воздействия ионизирующего излучения [1, 2].

Целью работы является экспериментальное исследование реакции на воздействие гамма-излучения одномодового радиационно-стойкого оптоволокна.

На первом этапе были проведены исследования на изотопной установке «Гамма Панорама МИФИ» с изотопом ¹³⁷Cs. Время облучения составило 790 часов, мощность дозы 0,27 Рад/с. Суммарная накопленная

доза составила 795 кРад. Во время облучения контролировалась оптическая мощность при прохождении сигнала через оптоволокно. Результаты контроля приведены на рис. 1.

Вторым этапом планируется проведение испытаний и обработка метода задания отрицательной температуры окружающей среды во время облучения оптоволокна на ускорителе электронов «У-31/33», работающем в режиме генерации тормозного излучения. Схема позиционирования оптоволокна представлена на рис. 2.

Задание температуры (-60°C) осуществляется стендом СЗТМ-0401 (охлаждение с помощью паров азота, поступающего по трубке в теплоизолированный короб). Равномерное облучение образца достигается вращением образца вокруг своей оси.

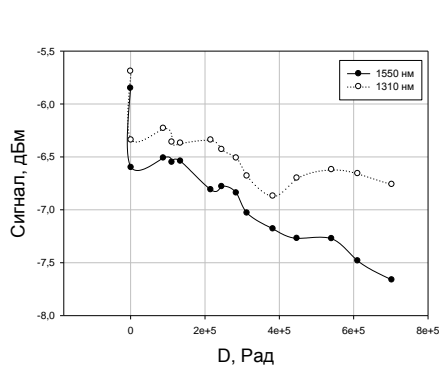


Рис. 1. График зависимости мощности оптического сигнала на выходе волокна от накопленной дозы при постоянной входной засветке $-5,0$ дБм

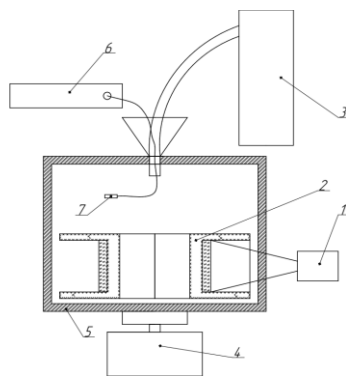


Рис. 2. Схема позиционирования оптоволокна при исследованиях на ускорителе электронов:

- 1 – мишень ускорителя;
- 2 – исследуемый образец;
- 3 – резервуар с жидким азотом;
- 4 – вращающаяся платформа;
- 5 – термоизолированный короб;
- 6 – блок управления;
- 7 – термопара

Список литературы

1. Liu F, An Y., Wang P., Shao B., Chen S. // in Effects of Radiation on Optical Fibers, Recent Progress in Optical Fiber Research / ed. M. Yasin. InTech, Dr, 2012.
2. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов В.Т. и др. «Фотон-экспресс». 2005. №6. С.114.

Б.А. КУЗЯКОВ

Московский технологический университет (МИРЭА)

**МЕТОД РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНА В АТМОСФЕРНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА**

В докладе рассматривается схема ретрансляции сигналов оптического диапазона с использованием квадрокоптера. Для моделирования схемы переотражения излучения, на корпус квадрокоптера установили лазерный излучатель. Получены зависимости изменения угла наклона лазерного излучения от номера измерения.

B.A. KUZYAKOV

Moscow Technological University (MIREA)

**A METHOD OF RETRANSMISSION SIGNALS
IN THE OPTICAL RANGE ATMOSPHERIC
COMMUNICATION LINE USING A QUADCOPTER**

The report discusses the scheme of retransmission signals of the optical range using the quadcopter. For the simulation of the scheme of reflection of radiation on the body of the quadcopter mounted laser emitter. The obtained dependences of change of the angle of inclination of the laser radiation from the room dimensions.

Работа посвящена важной и актуальной теме, поскольку в настоящее время квадрокоптеры широко применяются в разнообразных сферах науки и техники [1, 2], включая системы телекоммуникаций [3]. Рассмотрены возможности "пассивных" ретрансляторов. Для оценки их возможностей были проведены ряд экспериментов с использованием легкого квадрокоптера SYMA X54HW. Он обладает четырьмя винтами, размер - 40 x 40 см. Экспериментальные изменения (Δ) тангенса угла наклона лазерного излучения ($\text{tg } \theta$) принимают значения в диапазоне: 0,05 – 0,25, усредненное значение, составляет $\sigma_1 - 0,14$. Использовался также квадрокоптер типа HubSan X4. Он также обладает четырьмя винтами, размер – 12,5 x 12,5 см. В комплект его оснастки, бортовой барометр не входит. Квадрокоптер (рис. 1) "зависал" на высоте – 1,5 м от поверхности земли и удерживался на одном месте в одном положении в режиме ручного управления. В приемопередающем модуле использовался такой же лазерный излучатель на базе п/п кристалла, длина волны

излучения в видимом диапазоне - 0,68 мкм. По результатам измерений величины ($\text{tg } \theta$) принимают значения в диапазоне: 0,18 – 0,37, усредненное значение, составляет σ_2 – 0,34. Эти величины превышают значения, полученные в первом варианте.

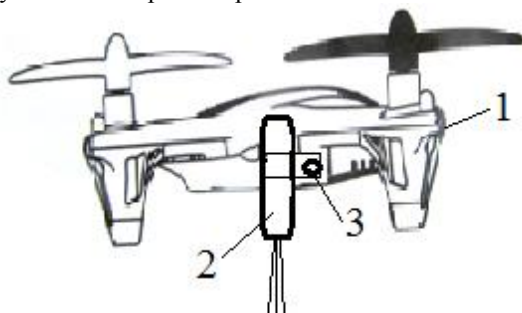


Рис. 1. Экспериментальный макет дрона: 1 - фюзеляж, 2 - лазерный источник, 3 - элементы крепления

При этом проведенные эксперименты показывают, что лазерное излучение дрона может покрывать значительную площадь приземной поверхности и может захватывать области расположения фотоприемников моделируемой системы связи. Так, как, при расходимости лазерного излучения – 0,1 и высоте полета дрона – 50 м, диаметр лазерного пучка на наземной поверхности, превышает 10 м.

Таким образом, показана возможность реализации схемы ретрансляции сигналов оптического диапазона в открытом пространстве с использованием легких квадрокоптеров разных типов.

Список литературы

1. Федутин Д. Билет на беспилотник // Военно-промышленный курьер. 2017. №29 (693). С.8-9.
2. Передача данных с борта БПЛА: Стандарты НАТО. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.liveinternet.ru/community/3629085/post199266296.2>.
3. Кузяков Б.А. Перспективные новации в оптических атмосферных телекоммуникационных системах // Теория и практика современной науки. 2017. № 7(25). С.26.
4. Алешин М.Г., Дьяконов С.В., Сивов А.Ю. Обоснование основных характеристик антенной системы и параметров управления мощностью передатчик ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Журнал радиоэлектроники. 2011. №12. С.21.

А.В. ГАМИЛОВСКАЯ, Ю.Н. ВОЛЬХИН,
А.С. АНДРЕЕВ, И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, РЕАЛИЗУЕМЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РАДИОФОТОНИКИ

В данной работе приведены результаты измерения параметров сверхширокополосного радиофотонного смесителя, предназначенного для преобразования радиосигналов дециметрового, сантиметрового и, потенциально, миллиметрового диапазонов длин волн.

A.V. GAMILOVSKAYA, Yu.N. VOLKHIN,
A.S. ANDREEV, I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

ULTRA-WIDEBAND FREQUENCY CONVERTER REALIZED WITH THE USE OF RADIOPHOTONICS METHODS AND MEANS

The results of measurements of the parameters of the ultra-wideband radio-photon mixer intended for the radio signals conversion of the decimeter, centimeter and potentially millimeter wavelength bands are presented in this work.

Одним из ключевых элементов приемных трактов радиоэлектронных систем для радиоэлектронной борьбы являются сверхширокополосные преобразователи частоты СВЧ-диапазона. Самые широкие диапазоны рабочих частот по всем входам-выходам имеют тройные балансные смесители, которые реализованы на диодах с барьером Шоттки. Однако даже они имеют относительно узкие диапазоны рабочих частот по выходу сигнала промежуточной частоты и любая попытка его расширения приводит к снижению верхней границы диапазона частот по входам радиосигнала и сигнала гетеродина. Поэтому разработчикам систем для радиоэлектронной борьбы приходится рассматривать другие варианты реализации сверхширокополосных преобразователей частоты с использованием других физических принципов, которые не предполагают использования только полупроводниковых нелинейных элементов. Ранее был проанализирован радиофотонный тракт (рис. 1), который состоял из источника оптического сигнала (ИОС), двух электрооптических модуляторов Маха-Цандера (ММЦ₁, ММЦ₂), трех оптических трактов

(OT_1 , OT_2 , OT_3) и фотодетектора (ФД) [1-3]. На выходе фотодетектора сформированы сигналы с частотами f_c , f_r , и сигналы промежуточной частоты с частотами $f_{пч} = f_c + f_r$ и $f_{пч} = f_r - f_c$.

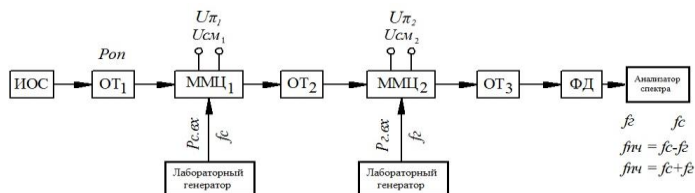


Рис. 1. Структурная схема сверхширокополосного радиофотонного тракта

В данной работе описаны результаты измерений некоторых параметров такого радиофотонного преобразователя частоты, который состоял из: источника оптического сигнала с длиной волны излучения $\lambda_{оп} = 1,55$ мкм и мощностью выходного сигнала $P_{оп} = 13$ дБм; первого модулятора Маха-Цандера с верхней границей диапазона рабочих частот по входу радиосигнала 12 ГГц, полуволновым напряжением $U_{\pi 1} = 4,4$ В и потерями в оптическом тракте $K_3 = 3,2$ дБ; второго модулятора Маха-Цандера с верхней границей диапазона рабочих частот по входу сигнала гетеродина 40 ГГц, $U_{\pi 2} = 3,3$ В и $K_3 = 4,5$ дБ; фотодетектора с верхней границей диапазона рабочих частот по выходу сигнала ПЧ 16 ГГц и фоточувствительностью $P_{ф} = 0,7$ А/В; оптических трактов OT_1 и OT_2 в виде волокон с сохранением поляризации типа PMF-28 и оптического тракта OT_3 (волокно SMF-28). Исследования показали, что составляющие спектра с частотами $f_c - f_r$ и $f_c + f_r$ достигают своего максимума при $P_{г.вх} \approx 21$ дБм. Это соответствует амплитуде сигнала гетеродина порядка 2,5 В. Оптимальная амплитуда сигнала гетеродина при напряжении смещения на втором модуляторе $U_{см2}$ соответствующем напряжению на электродах управляющих линий в одной из точек перегиба модуляционной характеристики второго модулятора, должна составлять $\frac{3}{4}$ от полуволнового напряжения второго модулятора. Развязка между трактами сигнала гетеродина и сигнала промежуточной частоты превышает 43 дБ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Белоусов А.А. и др. // Прикладная фотоника. 2014. №1. С.65-86.
2. Белоусов А.А. и др. // Матер. 5-й науч.-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». М.: Радиотехника, 2014. С.122-135.
3. Гамиловская А.В. и др. // Полупроводниковые приборы. Серия 2. 2015. №5 (239). С.4-11.

И.В. ВОЛКОВ^{1,2}

¹*Московский технологический университет (МИРЭА)*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва*

ОПТИЧЕСКАЯ ПОДСТРАИВАЕМАЯ ЛУЧЕФОРМИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРИЕМА РАДИОТЕЛЕСКОПА СВЧ ДИАПАЗОНА С 2D-ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Представлена оптическая диаграммо-формирующая система (ДФС) для ФАР, радиотелескопа (РТ), состоящая из двумерного массива антенных диполей, для формирования многолучевой диаграммы направленности (ДН) при помощи волоконно-оптических линий задержки (ВОЛЗ) реального времени. Расширение полосы частот наблюдений увеличивает чувствительность приемной аппаратуры РТ и позволяет исследовать слабые источники с более высоким разрешением.

I. V. VOLKOV^{1,2}

¹*Moscow Technological University (MIREA)*

²*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow*

OPTICAL ADJUSTABLE BEAMFORMING SYSTEM FOR EXPANSION OF THE RECEIVING BAND THE RADIOTELESCOPE VHF RANGE WITH A 2D PHASED ARRAY ANTENNAS

The report presents a optical diagram-forming system for a phased array, a radio telescope (RT) consisting of a two-dimensional array of antenna dipoles, and designed to form a multibeam directional pattern using real-time fiber-optic delay lines. Expansion of the frequency band of observations increases the sensitivity of the receiving equipment of RT and allows to study weak sources of radiation with a higher resolution.

Проблема расширения полосы приёма в ФАР РТ в VHF-диапазоне ($f \sim 110,5$ МГц) связана с трудностями формирования ДН РТ путём фазирования антенных диполей с помощью кабельных электрических линий задержек и (или) фазовращателей, фазированных матриц Батлера, Бласса, делителей мощности, и одновременного обеспечения минимального угла смещения (или отклонения) луча ДН от заданного положения при изменении частоты принимаемого сигнала в полосе приемной аппаратуры РТ и при угле наблюдения источника [2]. При угловом размере источника радиоимпульсов меньшей ширины луча ДН

для угла смещения $\Theta > 45^\circ$ могут возникать потери, либо флуктуации плотности потока излучения вследствие непопадания источника в центр лепестка многолучевой ДН. Поэтому при сканировании в более широкой полосе лучше использовать один или несколько лучей – но с большей шириной лепестка Θ по половинной мощности у каждого или с пересечением соседних лепестков ДН по большему уровню мощности. Наблюдение источника в нескольких лепестках ДН в отличие от одного позволяет надёжно исключать ЭМП земного происхождения вследствие дисперсии радиоволн источника космического происхождения в межзвёздной среде. В отличие от ДФС, жёстко привязанных к электрическим фазовращателям или фазосдвигающим матрицам, подстраиваемая оптическая ДФС позволяет с помощью ВОЛЗ и оптических переключателей быстро перестраивать число лучей ДН. При широком секторе обзора в малой полосе частот количество лучей $N = 128$. При малом угле обзора или широкой полосе наблюдений количество лучей в переключаемой ДФС $N = 1$, или 2. Сканирование в предлагаемой для РТ ДФС происходит только по одной координате – склонению (или углу места). Целью работы является описание оптической подстраиваемой ДФС для синтеза многолучевой ДН ФАР РТ, что показана в [1], но способную синтезировать разное, но фиксированное количество лучей в одной плоскости. Предлагаемая система основывается на схеме из работы [3], но немного изменена. К 256 лазерным диодам, которые излучают на фиксированных длинах волн, к выходам 256 электрооптических модуляторов (ЭОМ) добавлены ещё 256 оптических ответвителей 1×2 (по числу антенных диполей в ряду, ориентированному по склонению). Два вывода отв.(splitter)- это формирование двух ДН. С каждого из них модулированное по интенсивности оптическое излучение распространяется далее как в работе [3] - на входы управляемого мультиплексора (М). Количество М в ДФС зависит от числа каналов в каждом из таких М. Излучение с выходов М поступает в одно и то же одномодовое волокно типа SMF. Это волокно подключают к каскаду временных задержек, которые содержат управляемые оптические выключатели и БИВОЛЗ (англ. BIFODEL). После такого каскада задержек через демультиплексор (или разветвитель) и фотодетекторы (число которых равно числу лучей в ДН) оптическое излучение преобразуется в электрический VHF-сигнал и приходит на входы радиометров.

Список литературы

1. Орешко В.В., Латышев Г.А. и др. // Труды ИПА РАН. 2012. Вып.24. С.80.
2. Филиппов В.С., Пономарёв Л.И., Гринёв А.Ю. Антенны и устройства СВЧ. 1994.
3. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2014.

С.А. ГОНЧАРОВ¹, В.А. КРИВЕНКОВ¹, П.С. САМОХВАЛОВ¹,
И.Р. НАБИЕВ^{1,2}, Ю.П. РАКОВИЧ^{1,3,4}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Университет города Реймса, Шампань-Арденны, Франция

³Университет страны Басков, Сан-Себастьян, Испания

⁴Научный фонд страны Басков, Бильбао, Испания

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НАНОГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И ЗОЛОТЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ

Приведены результаты экспериментов по определению фотolumинесцентных свойств наногибридного материала на основе квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS (ядро/оболочка) и золотых наностержней (НС), заключенных в тонкие пленки ПММА. Показано, что времена жизни флюоресценции отдельных КТ в присутствии НС уменьшаются более чем на порядок. Также полученные результаты демонстрируют возможность наблюдения биэкситонной люминесценции КТ в гибридном материале КТ-НС.

S.A. GONCHAROV¹, V.A. KRIVENKOV¹, P.S. SAMOKHVALOV¹,
I.R. NABIEV^{1,2}, Yu.P. RAKOVICH^{1,3,4}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²University of Reims, Champagne-Ardenne, France

³Basque University, San Sebastian, Spain

⁴Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

PHOTOLUMINESCENCE PROPERTIES OF THIN-FILM NANOHYBRID MATERIAL BASED ON QUANTUM DOTS AND GOLD NANORODS

Experimental data on photoluminescence properties of hybrid material based on CdSe/ZnS core/shell quantum dots (QD) and gold nanorods (NR) in the thin films of PMMA are presented. The presence of NR causes at least an order-of-magnitude decrease of the photoluminescence lifetimes of single QD. Also obtained results have demonstrated the possibility of observing biexciton photoluminescence of QDs included in QD-NR hybrid material.

Благодаря своим фотофизическим свойствам [1], квантовые точки (КТ) показали себя перспективным материалом для создания новых систем оптоэлектроники и в лазерной генерации [2, 3]. Эффекты сильной и слабой связи между локализованными плазмонами в металлических

наночастицах благородных металлов и экситонами в КТ могут модулировать фотолуминесцентные (ФЛ) свойства КТ, расширяя их применения. В частности, эти эффекты могут существенно повлиять на излучательное время жизни ФЛ КТ, открывая перспективы значительного увеличения квантового выхода (КВ) ФЛ биэкситонного состояния отдельных КТ [4].

В работе изучены ФЛ свойства наногибридного материала на основе КТ CdSe/ZnS (ядро/оболочка) и золотых наностержней (НС), заключенных в тонкие пленки полиметилметакрилата (ПММА), в режиме однофотонного возбуждения ($\lambda = 485$ нм, $P \leq 3$ мВт). Чтобы выявить особенности ФЛ свойств КТ, возникающих в присутствии НС, была измерена кросс-корреляционная функция, описывающая вероятность регистрации излученного КТ фотона на одном из двух детекторов в зависимости от времени срабатывания двух детекторов ($\tau = t_2 - t_1$), $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t+\tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t+\tau) \rangle}$, как для отдельных КТ в матрице ПММА, так и в присутствии плазмонных наночастиц. В эксперименте с КТ наблюдалось подавление центральной части функции ($g^{(2)}(\tau = 0) \approx 0$), что подтверждает тот факт, что наблюдение осуществлялось за одиночной КТ, а не их кластером, а также говорит о том, что в эксперименте был достигнут режим генерации одиночных фотонов, а ФЛ биэкситонных состояний отсутствует. При этом, среднее время жизни ФЛ составило ~ 25 нс. В присутствии НС $g^{(2)}(\tau = 0)$ возрастает, что свидетельствует о росте КВ биэкситонного состояния КТ. При этом, измеренное характерное время жизни ФЛ отдельной КТ в гибридной системе составило $\sim 1,5$ нс, что также свидетельствует о биэкситонном характере наблюдаемой ФЛ.

Полученные результаты демонстрируют возможность наблюдения биэкситонной ФЛ КТ в гибридном материале на основе КТ и НС.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант № 14.Y26.31.0011.

Список литературы

1. Samokhvalov P., Artemyev M., Nabiev I. // Chemistry. 2013. V.19(5). P.1534-1546.
2. Klimov V.I., et al. // Nature. 2007. V.447(7143). P.441-446.
3. Rakovich A., et al. // ACS Nano. 2013. V.7(3). P.2154-2160.
4. Leblanc, S. J., et al., Nano Lett. 2013. V.13(4). P.1662-1669.

А.А. КОБРАНОВА, А.И. СИДОРОВ, В.Ф. ЛЕБЕДЕВ,
Т.В. АНТРОПОВА¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург*

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОАЛМАЗОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НАНОПОРИСТОМ СТЕКЛЕ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

Экспериментально показано, что при лазерной абляции углеродных квантовых точек в нанопористом стекле наносекундными лазерными импульсами ближнего ИК диапазона происходит трансформация углеродных квантовых точек в наноалмазы. Данный результат подтвержден спектрами люминесценции и комбинационного рассеяния.

A.A. KOBRANOVA, A.I. SIDOROV, V.F. LEBEDEV,
T.V. ANTROPOVA¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Grebenshchikov Institute of Chemistry of Silicates of the RAS, Saint-Petersburg*

FORMING OF NANODIAMONDS FROM CARBON QUANTUM DOTS IN NANOPOROUS GLASS UNDER LASER IRRADIATION

It is shown experimentally that during laser ablation of carbon quantum dots in nanoporous glass by nanosecond laser pulses the transformation of carbon quantum dots to nanodiamonds takes place. This result is confirmed by luminescence and Raman spectra.

Для синтеза углеродных квантовых точек (УКТ) наиболее широко используется метод пиролиза органических соединений [1]. Наноалмазы синтезируют детонационным методом [2], плазменным осаждением из паров органических соединений [3-5], магнетронным распылением [6]. В последнее время для синтеза наноалмазов широкое применение находит метод фемтосекундной лазерной абляции органических жидкостей [7, 8]. В то же время, представляет практический интерес возможность локального синтеза УКТ и наноалмазов твердофазным методом в нанопористых стеклах. Это даст возможность использования УКТ и наноалмазов в качестве микро- и наноразмерных источников света в

микро- и наноэлектронике, а также их использования в микросенсорах, например, в микрофлюидных сенсорных устройствах [9].

Целью работы являлось исследование возможности синтеза наноалмазов методом лазерной абляции нанопористых силикатных стекол с УКТ наносекундными лазерными импульсами ближнего ИК диапазона.

В экспериментах использовались пластины из нанопористого силикатного стекла толщиной 1 мм с сообщающимися порами, имеющими средний размер 25 нм. Поры заполнялись расплавом парафина, после чего проводился пиролиз при температуре 300 °С.

Абляция производилась однократными импульсами первой гармоники ($\lambda=1064$ нм) многомодового YAG:Nd лазера LQ-129 (Solar). Длительность лазерного импульса составляла 38 нс. Средняя плотность энергии варьировалась от 10 до 18.4 Дж/см². Диаметр лазерного пучка на поверхности подложки был равен 0.7 мм.

Спектры люминесценции были измерены с помощью спектрофлуориметра LS-55 (Perkin–Elmer). Спектры комбинационного рассеяния измерялись с помощью спектрометра inVia Raman microscope (Renishaw). Спектральные измерения проводились при комнатной температуре.

Эксперименты показали, что в результате пиролиза в порах нанопористого стекла формируются УКТ, что подтверждено спектрами люминесценции (люминесценция возникает в синей области спектра) и спектрами комбинационного рассеяния (возникают полосы на частотах 1360 и 1550 см⁻¹, связанные с гибридизацией углерода, характерной для кристаллического графита). После лазерного облучения в облученных зонах возникает красная люминесценция, а на спектрах комбинационного рассеяния возникает узкая полоса на частоте 1310 см⁻¹, что характерно для наноалмазов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке химических и биосенсоров.

Список литературы

1. Zhu S., Meng Q., Wang L., et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013. V.52. P.3953.
2. Danilenko V.V. // *Phys. Sol. State.* 2004. V.46. P.595.
3. Angus J.C. // *Diamond Relat. Mater.* 2014. V.49. P.77.
4. Gracio J.J., Fan Q.H., Madaleno J.C. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V.43. P.374017.
5. Sankaran R.M., Giapis K.P. // *J. Appl. Phys.* 2002. V.92. P.2406.
6. Wu Z., Tian X., et, al. // *Appl. Surf. Sci.* 2013. V.276. P.31.
7. Yang G.W. // *Progr. in Mater. Sci.* 2007. V.52. P.648.
8. Nee C.-H., Yap S.-L., et, al. // *Sci. Reports.* 2016. V.6. P.33966.
9. Zhang D., Men L., Chen Q. // *Sensors.* 2011. V.2. P.5360.

А.В. КОЛЧИН, Ф.В. КАШАЕВ, А.В. СКОБЁЛКИНА,
С.В. ЗАБОТНОВ, Л.А. ГОЛОВАНЬ, Д.Е. ПРЕСНОВ,
Т.П. КАМИНСКАЯ, П.К. КАШКАРОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА И
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРЕМНИЕВЫХ
НАНОЧАСТИЦАХ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДАМИ
ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ
И ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТЯХ**

Показана возможность формирования кремниевых наночастиц последовательным применением методов химического травления и лазерной абляции для биомедицинских приложений, которые обладают необходимыми структурными и оптическими свойствами.

A.V. KOLCHIN, F.V. KASHAEV, A.V. SKOBELKINA,
S.V. ZABOTNOV, L.A. GOLOVAN, D.E. PRESNOV,
T.P. KAMINSKAYA, P.K. KASHKAROV

Lomonosov Moscow State University

**FEATURES OF LIGHT SCATTERING
AND PHOTOLUMINESCENCE BY SILICON NANOPARTICLES
SYNTHESIZED BY CHEMICAL ETCHING
AND LASER ABLATION IN LIQUIDS**

Synthesis of silicon nanoparticles with structural and optical properties for biomedical applications by combination of chemical etching and laser ablation was shown.

Кремниевые наночастицы (КНЧ) обладают широкими перспективами для применения не только в оптоэлектронике, но и в биомедицинских приложениях для диагностики и лечения различных заболеваний [1]. Данное применение обусловлено такими свойствами КНЧ, как биodeградируемость, биосовместимость и низкий уровень токсичности. Значительные успехи были достигнуты при использовании метода электрохимического травления, в результате которого возможно формирование пористого кремния (ПК), и его дальнейшего механического измельчения. Полученные таким образом КНЧ могут применяться в качестве фотолюминесцентных маркеров и контрастирующих агентов в

оптической когерентной томографии, поскольку обладают эффективными фотолюминесценцией (ФЛ) и рассеянием света в диагностическом окне прозрачности биотканей (700-1100 нм). Также КНЧ могут быть сформированы методом импульсной лазерной абляции в различных жидкостях. Основными преимуществами данного метода являются химическая чистота конечного продукта и возможность формирования КНЧ размером меньше 50 нм. Представляется интересным последовательное изготовление КНЧ методами электрохимического травления и лазерной абляции, а также исследование их структурных и оптических свойств. В данной работе образцы ПК микропористого типа (размер пор до 2 нм) были сформированы путем электрохимического травления пластин кремния р-типа с удельным сопротивлением 2-5 $\Omega \cdot \text{см}$ в растворе $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}=1:2$ в течение 5 минут при плотности тока 15 $\text{мА}/\text{см}^2$. Затем образцы облучались пикосекундным импульсным Nd:YAG лазером (1064 нм, 30 пс, 10 Гц, 30 мДж) в буферной жидкости $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Размеры и фазовый состав наночастиц из аблированного ПК были исследованы с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), соответственно. Помимо этих свойств КНЧ были рассмотрены процессы ФЛ в образцах, формируемых методом лазерной абляции ПК в этаноле. Спектры ФЛ были получены при возбуждении второй гармоникой пикосекундного импульсного Nd:YAG лазера (532 нм).

Гистограмма распределения КНЧ по размерам демонстрирует наличие фракции с относительно малыми размерами от 2 до 20 нм, что упрощает их введение в живые организмы и способствует более быстрой биodeградации по сравнению с частицами больших размеров. Спектры КРС при длине волны возбуждения 632 нм свидетельствуют о наличии кристаллической (520 см^{-1}) и аморфной ($480\text{-}510 \text{ см}^{-1}$) фаз в полученных ансамблях КНЧ. Оптические спектры КНЧ свидетельствуют о наличии эффективной ФЛ в диапазоне 600-900 нм с максимумом на длине волны 730 нм. Данная особенность может быть обусловлена проявлением как квантово-размерного эффекта, так и наличием дефектных состояний.

Таким образом, в настоящей работе показано, что последовательным применением методов электрохимического травления и лазерной абляции становится возможным формирование КНЧ, обладающими структурными и оптическими свойствами, позволяющими применять их в биомедицинских приложениях.

Список литературы

1. Ксенофонтова О.И. и др. Пористый кремний и его применение в биологии и медицине // ЖТФ. 2014. Т.84. №1. С.67-78.

А.И. КАЛУГИН, Е.А. АНТОНОВ

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашиникова

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ИЗОЭЛЕКТРОННОГО РЯДА
КРИСТАЛЛОВ Ge-GaAs-ZnSe-CuBr**

Приведены результаты теоретических расчетов методом LAPW спектров диэлектрической проницаемости четырех кристаллов Ge, GaAs, ZnSe, CuBr. Определены основные закономерности изменения электронной структуры кристаллов одного изоэлектронного ряда.

A.I. KALUGIN, E.A. ANTONOV

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

**THEORETICAL SPECTRA OF PERMITTIVITY
OF ISOELECTRONIC CRYSTALS Ge-GaAs-ZnSe-CuBr**

Presents the result of theoretical calculations of the spectra of permittivity for the four crystals Ge, GaAs, ZnSe, CuBr. Were determined regularities of their electronic structures.

Кристаллы ряда Ge – GaAs – ZnSe – CuBr с давних пор используются в оптоэлектронной и лазерной технике. Их электронная структура довольно подробно изучена [1, 2], но по отдельности, без рассмотрения характера ее изменения в зависимости от ионности соединения.

Целью данной работы было исследование влияния ионности соединения на электронную структуру кристалла в изоэлектронном ряду. На основе расчетов методом LAPW [3] зонной структуры исследуемых кристаллов, были получены спектры диэлектрической проницаемости ϵ_2 четырех кристаллов. При этом рассчитаны не только интегральные кривые ϵ_2 , но и вклады переходов между отдельными парами валентных зон и зон проводимости. Это позволило установить тонкую природу максимумов интегральных спектров и установить динамику изменения электронной структуры при переходе от практически ковалентного кристалла Ge к сильно ионному кристаллу CuBr.

Теоретически интегральные спектры ϵ_2 в области энергии 0 - 8 эВ состоят из трех интенсивных максимумов (примерно при 3.6, 5.4 и 7.0 эВ) и нескольких слабых максимумов и ступенек (рис. 1). Так как ширины

запрещенной зоны четырех кристаллов различаются, то для удобства сравнения спектры Ge, GaAs и CuBr были смещены по энергии до совпадения с шириной запрещенной зоны у ZnSe.

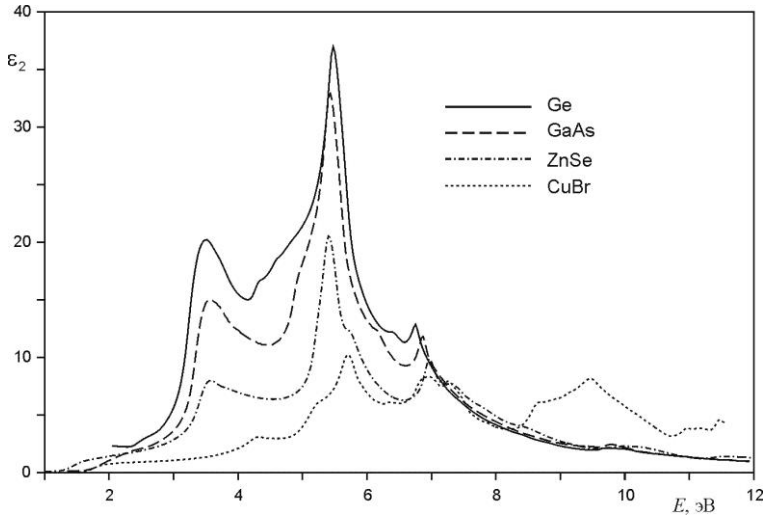


Рис. 1. Спектры диэлектрической проницаемости

Детальный анализ показал, что три основных максимума имеют одинаковую природу и обусловлены переходами из двух верхних валентных зон в две нижние зоны проводимости. Наблюдаемое изменение оптических свойств обусловлено влиянием d-состояний катиона. В случае Ge d-зоны расположены намного ниже вершины валентной зоны и не участвуют в формировании оптических свойств. Для GaAs d-зоны также оказывают сравнительно слабое влияние, тогда как для ZnSe d-состояния дают значительный вклад в верхние валентные состояния, а для CuBr их вклад является определяющим. Для первых трех кристаллов это приводит в основном к уменьшению интенсивности максимумов спектров, а для CuBr еще и к дополнительному сдвигу в сторону больших энергий.

Список литературы

1. Chelikowsky J.R., Cohen M.L. // Phys. Rev. B. 1976. V.14. №2. P.556–582.
2. Wang C.S., Klein B.M. // Phys. Rev. B. 1981. V.24. №6. P.3417–3429.
3. Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., Kvasnicka D., Luitz J. WIEN2k (Schwarz K., Techn. Universitat Wien, Austria). 2001.

К.В. ОРЕШКИНА, В.Д. ДУБРОВИН, И.С. ПИЧУГИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И КИНЕТИКА
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАТРИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫХ
СТЕКЛОЛ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОКРИСТАЛЛЫ SrF₂ И BaF₂
И ЕВРОПИЙ**

Проведено изучение кинетики кристаллизации натриевоалюмосиликатных стекол с добавлением стронция/бария и фтора. Исследована возможность активирования редкоземельными ионами нанокристаллов SrF₂ и BaF₂, а также изучены люминесцентные свойства таких стекол и стеклокерамик.

K.V. ORESHKINA, V.D. DUBROVIN, I.S. PICHUGIN
ITMO University, Saint-Petersburg

**LUMINESCENT PROPERTIES AND CRYSTALIZATION
KINETICS OF SODIUM ALUMINOSILICATE GLASS
CONTAINING SrF₂ AND BaF₂ NANOCRYSTALS
AND EUROPIUM**

Crystallization kinetics study of sodium aluminosilicate glass with strontium/barium and fluorine additives was conducted. The possibility of SrF₂ and BaF₂ nanocrystals activating by rare-earth ions and luminescent properties of this glass and glass-ceramics were studied.

В настоящее время одним из перспективных направлений исследований является разработка и получение стеклокерамик, сочетающих в себе достоинства стекол и кристаллов. Стеклокерамики, активированные редкоземельными ионами, являются перспективными материалами для использования в качестве активной среды для создания на их основе лазеров, волоконных усилителей, ап-конверсионных материалов, а также материалов для светодиодов, преобразующих синее излучение в белый свет [1]. Разработка стеклокерамических материалов является достаточно трудоемкой задачей ввиду наличия сильного рассеяния на границах раздела фаз, вызванного различием показателей преломления нанокристаллической фазы и матрицы стекла. Уменьшить рассеяние на границе фаз можно путем уменьшения размера выделяемых кристаллов или подбором материалов матрицы стекла и кристаллов с близкими показателями преломления.

Особый интерес представляют стеклокерамики с кристаллами малого размера, такие как натриевоалюмосиликатные стекла с нанокристаллами SrF_2 и BaF_2 , поскольку в них отсутствует рассеяние света во всем видимом диапазоне, а также давно известна возможность легирования данных монокристаллов редкоземельными ионами [2, 3].

В работе исследовались две группы стекол $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ системы, содержащих (группа №1) SrO и F и (группа №2) BaF_2 . Обе группы стекол были активированы 0,5 мол.% Eu_2O_3 . Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температуре 1510 °С (группа №1) и 1440 °С (группа №2) с перемешиванием расплава платиновой мешалкой. Температура стеклования была измерена методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Образцы термообрабатывались при температурах выше температуры стеклования 1-10 часов. Спектры люминесценции и значения квантового выхода были получены с помощью многоканального приемника Hamamatsu с интегрирующей сферой. Исследование кинетики кристаллизации было проведено с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima IV. Расчет размеров нанокристаллов был произведен по методу Дебая-Шеррера [4].

В работе показано, что в результате термообработки выше температуры стеклования в натриевоалюмосиликатных стеклах с добавлением стронция/бария и фтора происходит выделение нанокристаллов SrF_2 и BaF_2 , размер которых не превышает 20 нм. Кроме того, при изучении люминесцентных свойств натриевоалюмосиликатных стекол с добавлением стронция и бария, активированных ионами европия, и стеклокерамик на их основе было показано, что вхождение ионов Eu в нанокристаллическую фазу не происходит, а квантовый выход люминесценции падает в 2 раза для стеклокерамик с нанокристаллами SrF_2 и в 1,5 раза для стеклокерамик с нанокристаллами BaF_2 по сравнению с исходными стеклами, что противоречит результатам похожих исследований, приведенным в современной литературе [5, 6].

Список литературы

1. Bocker C., Wiemert J., Rüssel C. // Solid State Sciences. 2014. V.30. P.55-60.
2. Сизова Т.Ю., Шендрик П.Ю., Раджабов Е.А., Егранов А.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т.57. №12/3. С.189-192.
3. Ивановских К.В., Пустоваров В.А., Шульгин Б.В., Кирм М. // Физика твердого тела. 2005. Т.47. №8. С.1395-1397.
4. Scherrer P. // Nachr. Ges. Wis. Göttingen. Math.-Phys. Kl. 1918. V.2. P.98-100.
5. Qiao X., Fan X., Xue Z., Xu X., Luo Q. // J. of Alloys and Compounds. 2011. V.509. P. 4714-4721.
6. Chen D., Wang Y., Yu Y., Ma E., Zhou L. // J. of Solid State Chemistry. 2006. V.179. P. 532-537.

Н.А. ЛОЗИНГ^{1,2}, М.Г. ГЛАДУШ^{1,3}, Е.А. ЕКИМОВ⁴,
И.Ю. ЕРЕМЧЕВ¹

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

³*Московский педагогический государственный университет*

⁴*Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Троицк*

СПОНТАННЫЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ МИКРОКРИСТАЛЛА АЛМАЗА С ГЕРМАНИЕВЫМИ ЦЕНТРАМИ

Приведены результаты экспериментов по изучению флуоресцентных свойств микрокристаллов алмаза с центрами окраски Ge-V. Сообщается о наблюдении спонтанных переключений между тусклым и несколькими яркими режимами флуоресценции с выраженной динамикой нарастания и спада интенсивности на секундном масштабе. Предложено теоретическое обоснование наблюдавшихся режимов, основанное на возможности формирования коллективного ансамбля излучающих центров внутри микрокристалла, допускающего оптическую мультистабильность.

N.A. LOZING^{1,2}, M.G. GLADUSH^{1,3}, E.A. EKIMOV⁴,
I.Yu. EREMCHEV¹

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

³*Moscow State University of Education*

⁴*Vereshchagin Institute for High Pressure Physics of the RAS, Troitsk*

SPONTANEOUS VARIATIONS BETWEEN FLUORESCENCE INTENSITIES OF A DIAMOND MICROCRYSTAL WITH Ge-V CENTRES

We report the results of experimental studies of fluorescence properties shown by diamond microcrystals with Ge-V color centers. It is reported about observations of spontaneous switching between dim and several bright fluorescence modes with pronounced dynamics of the rising and descending intensity on the second time scale. A theoretical basis for the observed modes is proposed. The theory is based on the possibility of forming a collective ensemble of emitting centers inside a microcrystal that allows optical multistability.

Микро- и нано-кристаллы алмаза с германиевыми центрами окраски являются новыми синтезируемыми объектами [1, 2]. В настоящее время ведется активное изучение их оптических свойств и возможностей практического использования [2, 3]. Целью работы была регистрация флуоресцентных изображений отдельных микро- и наноалмазов с германиевыми центрами с помощью комбинированной системы: атомно-силового и флуоресцентного микроскопа-спектрометра с широкопольной засветкой и двумерным детектором. Программная обработка изображений позволила получить информацию об интенсивности флуоресценции и пространственном положении кристалла. Были восстановлены (рис. 1) флуоресцентные траектории микрокристалла алмаза с характерными размерами 2 мкм из которых видно, что интенсивность флуоресценции увеличивается в несколько раз в случайные моменты времени.

Анализ измеренных спектров флуоресценции и возбуждения флуоресценции и сравнение их с измерениями, полученными для других алмазов позволило сделать вывод об отсутствии в данном образце иных источников света, кроме германиевых центров. Повторяющиеся временные картины динамики нарастания и спада интенсивности свечения оказались нехарактерными для известных механизмов мерцания флуоресценции. Для объяснения переключения режимов флуоресценции была предложена теория, основывающаяся на механизмах возникновения кооперативной безрезонаторной оптической бистабильности (рис. 2), обобщенной на случай многоуровневых излучателей в диэлектрике.

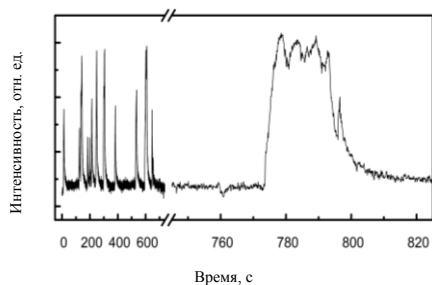


Рис. 1. Временная эволюция интенсивности флуоресценции

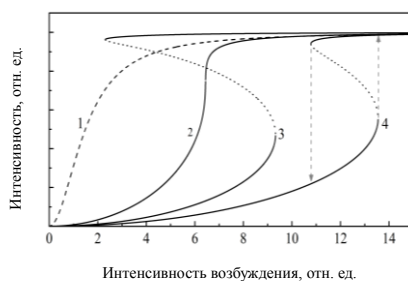


Рис. 2. Безрезонаторная бистабильность кооперативного ансамбля

Список литературы

1. Ekimov E.A., Lyapin S.G., et al. // JETP Lett. 2015. V.102, P.701.
2. Iwasaki T., Ishibashi F., et al. // Sci. Rep. 2015 V.5. P.12882.
3. Boldyrev K.N., Mavrin B.N., et al. // J. Lumin. 2018. V.193. P.119.

Е.А. АНТОНОВ, А.И. КАЛУГИН

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашиникова

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОНОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ АЛМАЗА

Рассчитаны спектры комплекса фундаментальных оптических функций алмаза в области 0-50 эВ на основе известных экспериментальных спектров объемных характеристических потерь энергии электронов с различным переданным волновым вектором. Спектры потерь и диэлектрической проницаемости разложены на элементарные компоненты, определены их основные параметры.

E.A. ANTONOV, A.I. KALUGIN

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

CHARACTERISTIC ENERGY LOSS AND PERMITTIVITY SPECTRA OF DIAMOND

Presents the result of calculations of the spectra of fundamental optical functions of diamond in the 0-50 eV energy range by the known experimental spectra of characteristic energy loss with the different wave vectors. The spectra of energy loss and permittivity were decomposed on the elementary components. Were determined their main parameters.

Алмаз и графит – самые простейшие модельные ковалентные кристаллы. В последние годы резко возрос интерес к электронной структуре алмаза в области 5-200 эВ [1, 2]. Однако изучают в основном методами прямых междузонных переходов, а непрямые переходы пренебрегают. Особенности спектров характеристических потерь энергии электронов при различных переданных волновых векторах \mathbf{q} значительно расширяют возможности случая прямых переходов. Они позволяют рассмотреть новый метод зондирования зон и получать новую информацию об электронной структуре кристаллов [3].

Экспериментальные спектры потерь энергии наиболее структурными оказались для направления $\langle 100 \rangle$ [4]. Поэтому в настоящей работе рассмотрены только результаты для него. Расчеты выполнены для $|\mathbf{q}| = 0.15 \text{ \AA}^{-1}$ и в интервале $(0.3 - 1.7) \text{ \AA}^{-1}$ с шагом $|\Delta\mathbf{q}| = 0.2 \text{ \AA}^{-1}$. Расчетные спектры диэлектрической проницаемости ϵ_2 приведены на рис. 1, а энергии максимумов полос спектров в зависимости от волнового вектора – на рис. 2. При $|\mathbf{q}| = 0.15 \text{ \AA}^{-1}$ кривая содержит острый максимум D

при 10.76 эВ и слабый пик *A* при 23.4 эВ. С ростом $|q|$ интенсивность пика *D* понижается почти на порядок при небольшом усилении пика *A*, причем они смещаются в область больших энергий. При $|q| > 0.7 \text{ \AA}^{-1}$ возникает дополнительный пик при 15.7 эВ, который смещается до 22 эВ при $|q| = 1.7 \text{ \AA}^{-1}$.

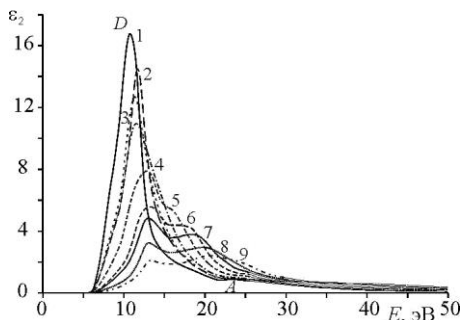


Рис. 1. Спектры диэлектрической проницаемости алмаза для $|q| = 0.15$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3), 0.7 (4), 0.9 (5), 1.1 (6), 1.3(7), 1.5 (8), 1.7 (9) \AA^{-1}

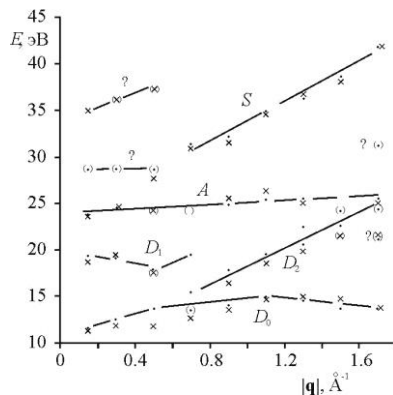


Рис. 2. Энергии максимумов и ступенек спектров ε_2 алмаза в зависимости от $|q|$

Интегральные спектры потерь и диэлектрической проницаемости алмаза были разложены на элементарные компоненты и определены энергии максимумов (рис. 2, для сравнения на рисунке крестиками указаны энергии максимумов спектра поглощения) и полуширин полос, площади и амплитуды. Всего установлено 17 продольных непрямых полос переходов, что гораздо больше, чем наблюдается в интегральных кривых. Установлено сильное влияние значения $|q|$ на формирование структур оптических спектров и их интенсивности.

Список литературы

1. Edmonds M.T., Tadich A., et al. // Phys. Rev. B. 2013. V.87. №8. P.085123.
2. Hazama Y., Naka N., Stolz H. // Phys. Rev. B. 2014. V.90. №4. P.045209.
3. Соболев В.В., Антонов Е.А., Соболев В.Вал. // ФТП. 2010. Т.44. В.9. С.1206-1210.
4. Waidmann S., Knupfer M., et al. // Phys. Rev. B. 2000. V.61. №15. P.10149-10153.

М.В. ПЯТНОВ¹, А.Ю. АВДЕЕВА¹, С.Я. ВЕТРОВ^{1,2}
¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*
²*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

ГИБРИДНЫЕ СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД В ХИРАЛЬНОЙ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

Исследовано взаимодействие дефектной моды хирального фотонного кристалла содержащего твист-дефект и оптического состояния локализованного на границе кристалла с металлической пленкой. Показано, что возникающая при этом резонансная ситуация приводит к появлению в спектре пропускания структуры гибридного состояния двух локализованных мод различной природы.

М. V. PYATNOV¹, A. Yu. AVDEEVA¹, S. Ya. VETROV^{1,2}
¹*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*
²*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

HYBRID STATES OF OPTICAL LOCALIZED MODES IN CHIRAL PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURE

The interaction of a defective mode of a chiral photonic crystal containing a twist-defect and an optical state localized at the crystal with a metallic film boundary is investigated. It is shown that the resulting resonance situation leads to the appearance in the transmission spectrum of the hybrid state structure of two localized modes of various nature.

В последнее время интенсивно исследуются гибридные состояния резонансов различной природы [1-4]. Особый интерес представляют взаимодействие оптического таммовского состояния (ОТС) и дефектных мод. Ряд авторов исследовали гибридные состояния ОТС и дефектных мод в фотоннокристаллических металл-содержащих системах [1-3]. В данной работе, мы предлагаем структуру, содержащую хиральный фотонный кристалл, а именно холестерический жидкий кристалл (ХЖК). Предлагаемая структура состоит из дефект-содержащего ХЖК, четвертьволновой фазовой пластинки и металлической пленки. Наличие фазовой пластинки обосновано поляризационными особенностями ХЖК, а именно тем фактом, что ХЖК отражает свет круговой поляризации, совпадающей с закруткой спирали, в то время как металл изменяет направление этой поляризации после отражения. В системе «ХЖК –

фазовая пластинка – металл» было продемонстрировано возникновение оптических мод, локализованных с максимумом на границе пластинка – металл [5]. В данной работе, структура ХЖК содержит твист-дефект. Это приводит к тому, что помимо оптических локализованных мод, в структуре возбуждается дефектная мода.

Связывание между ОТС и дефектной модой можно продемонстрировать наличием в спектре пропускания структуры квазипересечения пиков пропускания, соответствующих различным модам (рис. 1). Вариация частоты пика, соответствующего дефектной моде осуществлялась путем изменения угла твист-дефекта α .

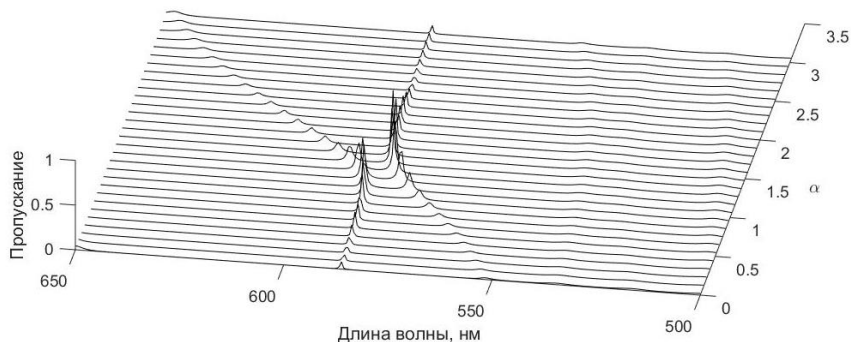


Рис. 1. Спектр пропускания структуры при варьировании угла твист-дефекта α

Преимущество рассмотренной модели, по сравнению с ранее предложенными скалярными моделями, заключается в возможностях перестройки спектра пропускания при помощи внешних воздействий.

Список литературы

1. Kaliteevski M., Brand S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V.95. P.251108.
2. Brückner R., Sudzius M., et al. // Phys. Rev. B. 2011. V.83. P.033405.
3. Rahman S.-U., Klein T., et al. // Sci. Rep. 2016. V.6. P.34392.
4. Afinogenov B.I., Bessonov V. O., et al. // Appl. Phys. Lett. 2013 V.103. P.061112.
5. Vetrov S. Ya., Pyatnov M.V., Timofeev I.V. // Opt. Lett. 2014. V.39. P. 2743.

И.С. КРЮКОВА¹, Д.С. ДОВЖЕНКО¹, А.А. ЧИСТЯКОВ¹,
И.Р. НАБИЕВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Университет города Реймса, Шампань-Арденны, Франция

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВОБОДНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА БАЗЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

В работе исследовалось изготовление отделенных от подложки одномерных микрорезонаторов на основе пористого кремния методом электрохимического анодирования в режиме электрополировки. Продемонстрировано, что после отслоения пористой структуры спектры отражения не претерпевают значительных изменений.

I.S. KRYUKOVA¹, D.S. DOVZHENKO¹, A.A. CHISTYAKOV¹,
I.R. NABIEV^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²University of Reims, Champagne-Ardenne, France

PREPARATION OF FREESTANDING POROUS SILICON PHOTONIC CRYSTALS

In this study we have investigated the fabrication of freestanding porous silicon photonic crystals. The lift-off process has been performed with the use of electropolishing method following the electrochemical etching of porous silicon layers. It has been demonstrated that there was not any significant change in the reflection spectra of the freestanding porous photonic crystals comparing to their spectra before the lift-off from the substrate.

В настоящее время большой интерес представляют сенсорные системы на базе пористых матриц. Свободно отстоящая пористая матрица как активный элемент сенсора значительно увеличивает эффективность детектирования благодаря возможности прокачки анализа сквозь пористую структуру, как для газовых сенсоров, работающих по принципу сдвига спектра отражения вследствие локального изменения коэффициента преломления, так и для гибридных сенсоров типа «фотонный кристалл/люминофор», в основе работы которых лежит регистрация сигнала селективных флуоресцентных меток [1, 2] или тушения люминесценции [3]. Кроме того, свободно отстоящие пористые матрицы способны увеличить эффективность солнечных ячеек [4] и могут

быть использованы в качестве оптических элементов, работающих на пропускание: узкополосных и краевых фильтров.

В настоящей работе изготавливались свободные микрорезонаторы на основе пористого кремния и измерялись их спектры отражения до и после отслоения от подложки (рис. 1). Показано, что спектры отражения микрорезонаторов остаются практически неизменными, что позволяет говорить о том, что разработанная методика отслоения не нарушает целостности образцов и не влияет на их морфологию.

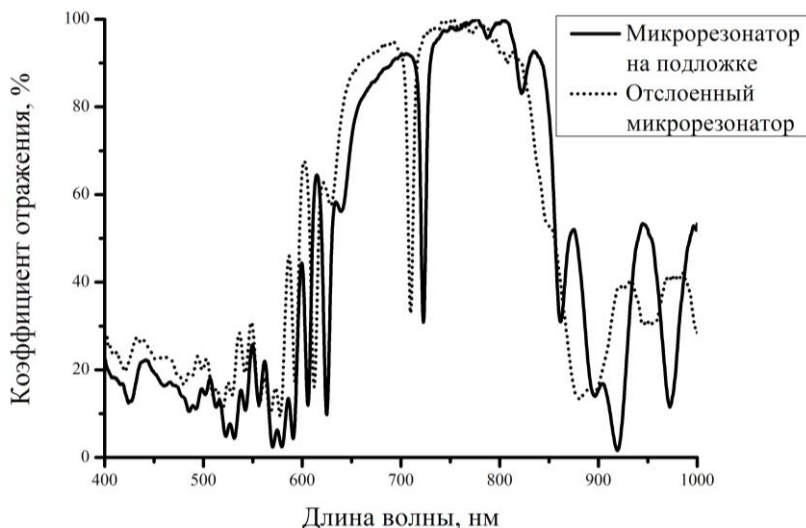


Рис. 1. Спектры отражения микрорезонатора на подложке и отслоенного микрорезонатора

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант № 14.Y26.31.0011.

Список литературы

1. La Mora M.D., et al. Porous Silicon Biosensors // *State Art Biosens. Gen. Asp.* 2013. P.141–161.
2. Kotkovskiy G.E., et al. The photophysics of porous silicon: technological and biomedical implications // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2012. V.14. № 40. P.13890.
3. Levitsky I. Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors // *Sensors.* 2015. V.15. №8. P.19968–19991.
4. Solanki C.S., et al. Characterization of free-standing thin crystalline films on porous silicon for solar cells // *Thin Solid Films.* 2004. V.451–452. P.649–654.

П.С. ПАНКИН^{1,2}, С.Е. СВЯХОВСКИЙ³, А.М. ВЬЮНЫШЕВ^{1,2},
И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}, С.Я. ВЕТРОВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ДЕФЕКТНЫЕ МОДЫ В КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Метод суперпозиции модуляции показателя преломления использован для создания сопряженных квазипериодических фотонных кристаллов (КПФК). Исследовано спектральное проявление дефектных мод, локализованных на границе между двумя структурами. Положение дефектных мод может быть подобрано путем выбора соответствующих значений пространственных частот сопряженных КПФК.

P.S. PANKIN^{1,2}, S.E. SVYAKHOVSKIY³, A.M. VYUNISHEV^{1,2},
I.V. TIMOFEEV^{1,2}, S.Ya. VETROV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

³*Lomonosov Moscow State University*

DEFECT MODES IN QUASIPERIODIC PHOTONIC CRYSTAL

The method of refractive index superposition modulation is used to create conjugated quasiperiodic photonic crystals (QPPC). The spectral manifestation of defect modes localized at the boundary between two structures is investigated. The position of the defect modes can be adjusted by selecting the values of appropriate spatial frequencies of the conjugated QPPC.

Квазипериодические фотонные кристаллы представляют собой слоистые структуры с непериодическим распределением показателя преломления в пространстве, которое подчиняется наперед заданному правилу. На основе КПФК были предложены идеальные поглотители, многомодовая фотон-экситонная связь, медленные моды и др. [1-3].

Для формирования КПФК в данной работе был использован метод суперпозиции модуляции показателя преломления [4]. В этом случае функция пространственной модуляции показателя преломления может быть представлена в виде

$$n(z) = n_0 + \Delta n \operatorname{sign}(a_1 \sin(G_1 z) + a_2 \sin(G_2 z)). \quad (1)$$

Здесь n_0 – среднее значение показателя преломления, Δn – максимальное отклонение величины показателя преломления от n_0 , a_j и G_j – относительная амплитуда и пространственная частота j -й компоненты. Величины G_j определяют положение фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) КПФК, которые могут быть настроены независимо друг от друга. Два КПФК с попарно перекрывающимися ФЗЗ (рис. 1) были сопряжены для формирования дефектного слоя на границе раздела. Для расчета спектра отражения структуры методом трансфер-матрицы были взяты параметры $G_1=21.4$ мкм⁻¹ и $G_2=38.6$ мкм⁻¹ для первого КПФК, толщиной 8.32 мкм, и $G_3=22.8$ мкм⁻¹ и $G_4=36.1$ мкм⁻¹ для второго КПФК, толщиной 8 мкм. Показатель преломления $n_0 = 1.4$, $\Delta n = 0.08$. Структура была изготовлена путем вариации пористости кремния методом электрохимического травления [5]. В областях перекрывания запрещенных зон КПФК видны пики (рис. 2), соответствующие дефектным модам, локализованным на границе между двумя структурами. Метод суперпозиции модуляции показателя преломления позволяет настраивать положения ФЗЗ КПФК и, соответственно, положение дефектных мод.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности №16-42-243065 и №17-42-240464.

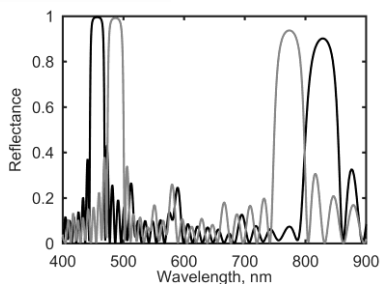


Рис. 1. Коэффициент отражения структуры первого (черный) и второго (серый) КПФК

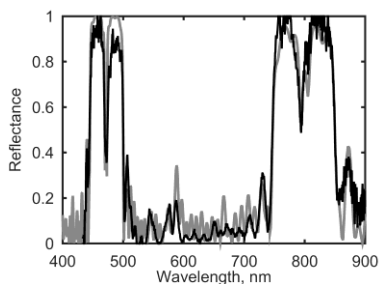


Рис. 2. Измеренный (черный) и рассчитанный (серый) коэффициент отражения структуры двух сопряженных КПФК

Список литературы

1. Gong Y., et al. // Optics express. 2011. V.19(10). P.9759.
2. Alagappan G., et al., // Sci. Rep. 2016. V.6, P.1.
3. Zhang K., et al. // Optics Letters. 2016. V.41. P.5740.
4. Vyunishhev A.M., et al. // Optics Letters. 2017. V.42. P.3602.
5. Svyakhovskiy S.E., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V.112. P.013106.

Е.В. ВИЛЕЙШИКОВА, Г.Е. РАЧКОВСКАЯ¹,
С.Е. КИЧАНОВ², Г.Б. ЗАХАРЕВИЧ¹

Белорусский национальный технический университет, Минск
¹*Белорусский государственный технологический университет, Минск*
²*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

СТРУКТУРА И КООПЕРАТИВНАЯ АП-КОНВЕРСИЯ ОКСИФТОРИДНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ $\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}:\text{PbF}_2$

Исследована структура оксифторидной стеклокерамики с нанокристаллами $\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}:\text{PbF}_2$ методом малоуглового рассеяния нейтронов. Исходные стекла имеют сложную микроструктуру, состоящую из организованных областей неоднородностей, которые являются катализаторами кристаллизации PbF_2 . Структурные перестройки приводят к существенному увеличению (до 80%) эффективности ап-конверсионного кооперативного переноса энергии $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{RE}^{3+}$.

E.V. VILEJSHIKOVA, G.E. RACHKOVSKAYA¹,
S.E. KICHANOV², G.B. ZAKHAREVICH¹

Belarussian National Technical University, Minsk
¹*Belarussian State Technological University, Minsk*
²*Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna*

STRUCTURE AND COOPERATIVE UP-CONVERSION OF OXYFLUORIDE GLASS-CERAMICS WITH $\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}:\text{PbF}_2$ NANOCRYSTALS

The structure of oxyfluoride glass ceramics with nanocrystals $\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}:\text{PbF}_2$ has been studied by small-angle neutron scattering. The initial glass has a complex microstructure consisting of organized regions of inhomogeneities, which induce crystallization of PbF_2 . Structural transformations lead to a significant increase (up to 80%) in the efficiency of up-conversion cooperative energy transfer $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{RE}^{3+}$.

Фторсодержащие стеклокристаллические оптические матрицы характеризуются неоднородной микроструктурой, с областями, насыщенными фторидами металлов. Благодаря специфической микроструктуре, приводящей к кластеризации областей, содержащих редкоземельные ионы, увеличивается вероятность безызлучательного переноса между ними, что благоприятно для наблюдения ап-конверсии.

В работе представляются результаты исследования структурных и спектрально-люминесцентных свойств оксифторидной стеклокерамики,

активированной ионами Eu^{3+} , Tb^{3+} и Yb^{3+} . Оксифторидные стекла были синтезированы в системе $40\text{SiO}_2\text{--}20\text{PbO--}30\text{PbF}_2\text{--}10\text{CdF}_2$ при температуре $900\pm 50^\circ\text{C}$ с последующим отжигом при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$. Основная матрица стекла была активирована оксидом европия Eu_2O_3 (1 мол. %) и тербия Tb_2O_3 (1 мол. %), а также фторидом иттербия YbF_3 . Синтез стеклокерамики осуществлялся при температуре 400°C на протяжении 6 ч. в воздушной атмосфере. Структура стеклокерамики исследовалась (рис. 1) методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Диапазон малых Q соответствует рассеянию от фрактальных объектов с большими размерами, предположительно, от флуктуаций плотности внутри матрицы. В этой области наблюдается постепенное снижение интенсивности рассеянных нейтронов. При $Q \sim 0.01 \text{ \AA}^{-1}$ обнаружена выраженная аномалия на кривых рассеяния в виде провала интенсивности. По наклону кривой рассчитаны значения фрактальной размерности флуктуаций плотности, которые составили 2.81(8) для исходного стекла и 2.78(5) для термообработанного при 400°C . При $Q > 0.01 \text{ \AA}^{-1}$ на наблюдается широкий ассиметричный пик, указывающий на рассеяние нейтронов на наноразмерных кластерах. Наблюдаемые изменения можно интерпретировать следующим образом. При температуре отжига 300°C области неоднородности организуются в сложные полимерные структуры. При вторичной термической обработке стекла происходит формирование нанокристаллов PbF_2 из исходных концентрационных неоднородностей. При этом перестройки происходят быстро, что проявляется резкой перестройкой формы полос оптического поглощения и люминесценции. Кооперативная ап-конверсионная люминесценция в системе $\text{Yb}^{3+}\text{--}\text{Tb}^{3+}$ и $\text{Yb}^{3+}\text{--}\text{Eu}^{3+}$ наблюдается при возбуждении излучением лазерного диода на длине волны 960 нм (рис. 2). По уменьшению времени затухания люминесценции ионов-сенситизаторов (Yb^{3+}) определены вероятности кооперативного переноса $\text{Yb}^{3+}\text{--}\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$ (Tb^{3+}). При формировании наноразмерной упорядоченной фазы PbF_2 в результате вторичной термообработки эффективность этого процесса увеличивается от 28 % для исходного стекла до 80% в стеклокерамике.

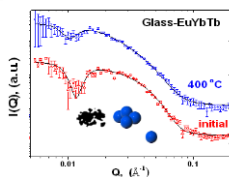


Рис. 1. Кривые МУРН исходного стекла (*initial*) и стеклокерамики

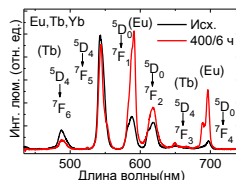


Рис. 2. Ап-конверсионная люминесценция исходного стекла и стеклокерамики

М.В. СТОЛЯРЧУК, Д.И. ЧЕРНАКОВ, А.И. СИДОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЗАПИСЬ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В ФТР СТЕКЛЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Работа посвящена записи оптических люминесцентных волноводов УФ-излучением в фототерморефрактивном (ФТР) стекле, содержащем серебро и церий. Люминесцентные измерения демонстрируют, что субнаноразмерные кластеры серебра ответственны за формирование волновода. Экспериментальные измерения показателя преломления голографическим способом сопровождаются квантовохимическими расчетами, которые показали, что вклад в изменение показателя преломления преимущественно вносят нейтральные кластеры серебра.

M.V. STOLYARCHUK, D.I. CHERNAKOV, A.I. SIDOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

ULTRAVIOLET WRITING OF OPTICAL LUMINESCENT WAVEGUIDES IN PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS

We have written optical waveguides by ultraviolet light irradiation in silver-containing photo-thermo-refractive glass. Luminescence measurements indicate that subnanosized silver clusters are responsible for the waveguide formation. The experimental study is complemented with quantum chemical calculations that show that the refractive index change is mainly dominated by neutral silver clusters polarizability.

Фототерморефрактивные (ФТР) стекла [1], содержащие серебро, используются для записи брэгговских объемных решеток, а также в разработке полифункциональных материалов для нужд фотоники и интегральной оптики. Кроме того, ФТР стекла могут служить матрицей для исследований субнаноразмерные кластеры серебра. Люминесцентные оптические волноводы и волокна, содержащие сильно излучающие кластеры, являются перспективными чувствительными элементами для различных регистрирующих систем [2]. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований записи УФ-излучением оптических волноводов в ФТР стекле, активированное церием и серебром.

Образцы данного стекла, изначально содержащие ионы Ag^+ и заряженные кластеры серебра Ag_n^{q+} [1], облучались излучением He–Cd лазера (325 нм), что приводило к появлению слабой люминесценции

(рис. 1а) в видимой области спектра – результат захвата заряженными кластерами серебра свободных фотоэлектронов ионов Ce^{3+} . Количественная характеристика индуцированного изменения показателя преломления определялась в ходе измерений голографическим способом по формуле Когельника.

Для анализа возможного источника изменения показателя преломления была рассчитана статическая электронная поляризуемость нейтральных и заряженных кластеров (рис. 1б) на основе теории функционала плотности. Применив известное уравнение Лоренца–Лоренца, было проанализировано качественное изменение молекулярной рефракции при УФ-облучении. Согласно полученным результатам, большая поляризуемость нейтральных кластеров серебра по отношению к заряженным может определять изменение показателя преломления.

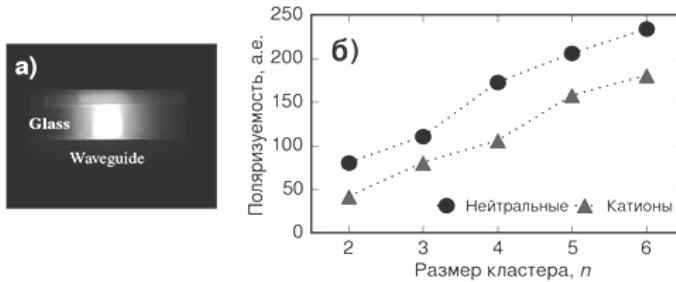


Рис. 1. Фотография люминесценции в записанном волноводе (вид с торца волновода), длина волны возбуждения 365 нм (а); рассчитанные значения полных поляризуемостей нейтральных и заряженных субнаноразмерных кластеров серебра $\text{Ag}_n^{0/+1}$ (б)

Таким образом было показано, что методом УФ-облучения стекла указанного состава без последующей химической или термообработки могут быть записаны оптические волноводы, обладающие люминесценцией. Фотоиндуцированное изменение показателя преломления вызвано фотохимической реакцией восстановления, в ходе которой заряженные кластеры серебра трансформируются в нейтральные, обладающие большей поляризуемостью.

Список литературы

1. Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // Opt. Mat. 2014. V.36. P.753.
2. Agafonova D.S., Sidorov A.I., Kolobkova E.V., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Shakhverdov T.A., Shirshnev P.S., Vasiliev V.N. // Opt. Eng. 2015. V.54. P.117107.

В.Н. ДАВЫДОВ, В.И. ТУЕВ, О.А. КАРАНКЕВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА ОНЗАГЕРА
К ПОЛЯРНО-АКСИАЛЬНЫМ ЯВЛЕНИЯМ
В КРИСТАЛЛООПТИКЕ**

Изложен подход к определению природы тензора второго ранга, описывающего линейную связь между внешним воздействием (причиной) на кристалл и вызываемым следствием. Получены выражения наблюдения физических свойств кристалла полярной и аксиальной природы при различных рангах и различной природе причины и следствия. Продемонстрировано их применение для описания уже известных свойств и предсказания новых свойств второго и третьего рангов. Предложенное расширение принципа Онзагера не только увеличивает число охватываемых им явлений, но и предсказывает новые свойства полярной и аксиальной природы – градиентные и дивергентные.

V.N. DAVYDOV, V.I. TUEV, O.A. KARANKEVICH

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

**APPLICATION OF ONZAGER PRINCIPLE TO THE POLAR
AND AXIAL PHENOMENA IN THE CRYSTAL OPTICS**

Approach to definition of the nature of a tensor of the second rank describing the linear communication between external impact (reason) on a crystal and the caused corollary is explained. Expressions of observation of physical properties of a crystal of the polar and axial nature at various ranks and various nature of cause and effect are received. Their application for the description of already known properties and prediction of new properties of the second and third ranks is shown. The offered expansion of the principle Onzager not only increases number of the phenomena covered by it, but also predicts new properties of the polar and axial nature – gradient and divergent.

В настоящее время при создании элементной базы и приборов оптоэлектроники и фотоники широко используют физические свойства кристаллов, описываемые тензорами различных рангов и имеющих различную физическую природу [1, 2]. Их использование как функционала преобразования входного сигнала по сравнению с элементами микроэлектроники позволяет создавать элементы более простые по принципу работы и по более простым технологиям. Для выявления физических свойств полярного типа в кристаллофизике

применяют принцип Онзагера, который предсказывает природу физического свойства второго ранга в зависимости от природы и ранга внешнего воздействия, а также природы и ранга вызываемого им следствия. Для физических свойств аксиального типа, а также сочетания полярных и аксиальных свойств в физических явлениях, часто имеющих место в фотонике, принцип определения природы свойства не сформулирован [3].

Целью данной работы является распространение принципа определения природы физического свойства как для аксиальных воздействий и следствий, так и для полярно-аксиальных процессов и явлений в кристаллооптике.

В основу метода расширения применимости принципа Онзагера к описанию явлений, в которых сочетаются полярные и аксиальные свойства кристалла положено применение дифференциальных операторов к базовому выражению, представляющего собой аналитическое представление принципа Онзагера. В работе использованы дифференциальные операторы, повышающие ранг тензора, уменьшающие его, но не меняющие природу тензора, а также дифференциальный оператор, применение которого к тензору не меняет его ранг, но меняет физическую природу описываемого им физического свойства. Составлены аналитические выражения для обнаружения и описания физических свойств как полярной, так и аксиальной природы при различных рангах и различной природе причины и следствия. Показано, как пользуясь полученными соотношениями можно описать новое физическое свойство второго ранга и указать условия его наблюдения

Проведенное расширение применимости принципа Онзагера не только увеличивает число охватываемых им явлений за счет вариаций природы и величин тензоров причины и следствия. Оно также позволяет предсказать новые физические свойства кристаллов различной природы и разных рангов. В работе получены соотношения, предсказывающие существование новых классов свойств: градиентных [4] и дивергентных.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Список литературы

1. Yan D., Lu H., Chen D., Zhang R., Zheng Y. // Appl. Phys. Lett. 2010. V.95. P.083.
2. Сойфер В.А. // Компьютерная оптика. 2008. Т.32. № 2. С.110-119.
3. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979.
4. Stepanov S.I. // Repts. Progr. Phys. 1994. V.57. №1. P.39-116.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, А.П. РУСИНОВ, Д.А. КИСЛОВ

Оренбургский государственный университет

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТЕРЖНЕЙ С АКТИВИРОВАННЫМИ ПЛАЗМОННЫМИ МОДАМИ

Проведено моделирование электромагнитного поля оптической частоты в периодических решетках, составленных из параллельных проводящих наностержней, в квазистатическом приближении и FDTD методом. Показано качественное согласие этих подходов при расчете характеристик поля в решетке.

M.G. KUCHERENKO, A.P. RUSINOV, D.A. KISLOV

Orenburg State University

CALCULATION OF FIELD CHARACTERISTICS IN PERIODIC GRATINGS MADE UP OF METAL NANORODS WITH ACTIVATED PLASMON MODES

Modeling of the electromagnetic field at optical frequency in periodic gratings composed of parallel conducting nanorods in the quasistatic approximation and FDTD method carried out. Shown qualitative agreement between these approaches in the calculation of the characteristics of the field in the grating.

В однородном электромагнитном поле оптической частоты с вектором напряженности \mathbf{E}_0 бесконечный проводящий наностержень поляризуется так, что дипольный момент единицы длины наностержня есть $\mathbf{P}_2(\omega) = \alpha_0(\omega)\mathbf{E}_0$, где $\alpha_0(\omega)$ - поляризуемость единицы длины.

В системах с двумя и более параллельными наностержнями необходимо учитывать их взаимное влияние друг на друга. В случае регулярного пространственного расположения стержней эффективный дипольный момент каждого стержня может быть представлен в виде $\mathbf{P}_2(\omega) = \tilde{\alpha}_{eff}\mathbf{E}_0$, где эффективная поляризуемость и функция Грина есть

$$\tilde{\alpha}_{eff} = \left[\tilde{\mathbf{I}} - \alpha_0 \sum_i \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_i) \mathbf{P}_2(\omega) \right]^{-1} \alpha_0, \quad \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{r^2} [2\mathbf{r} \otimes \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{I}}].$$

Распределение поля для квазидвумерной регулярной квадратной решетки из бесконечных проводящих наностержней приведено на рис. 1.

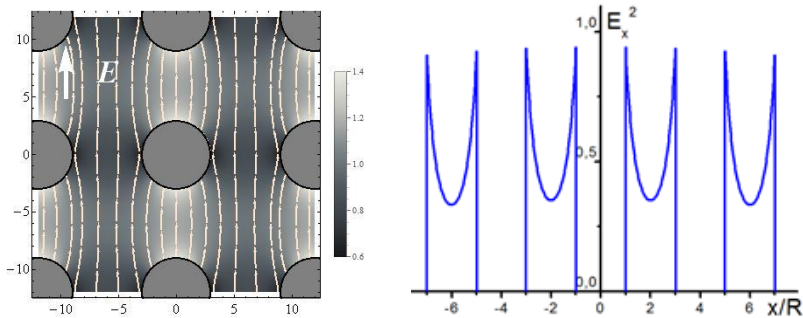


Рис. 1. Структура поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ и его относительная амплитуда $|\mathbf{E}(\mathbf{r})|/E_0$ в прямоугольной решетке из наноцилиндров (слева) и поперечное сечение интенсивности поля вдоль вектора \mathbf{E}_0 (справа)

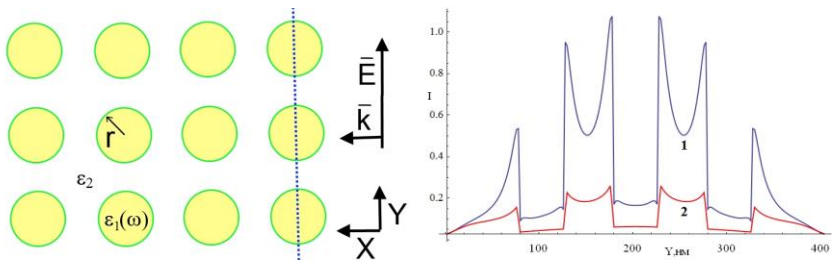


Рис. 2. Схема FDTD расчета (слева) и зависимость интенсивности электрического поля в прямоугольной решетке из наноцилиндров в поперечном сечении вдоль вектора \mathbf{E}_0 (справа): 1 – серебряные, 2 - SiO_2 наноцилиндры

Альтернативным способом расчета локального электромагнитного поля может служить прямое численное решение уравнений Максвелла FDTD методом. Результаты моделирования электромагнитного поля в квадратной решетке поля приведены на рис. 2.

Из приведенных зависимостей видно, что структура локального поля в системе регулярных проводящих наноцилиндров рассчитанная разными методами качественно совпадает.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания № 3.7758.2017/БЧ, РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-04132\17_a и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (стипендия Президента Российской Федерации, № СП-1340.2015.1).

В.И. ЗАКОМИРНЫЙ^{1,2}, В.С. ГЕРАСИМОВ¹, А.Е. ЕРШОВ^{1,3}

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

²*Королевский технологический институт, Стокгольм, Швеция*

³*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

НИТРИД ТИТАНА КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПЛАЗМОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР С УЗКИМ РЕЗОНАНСОМ

Исследованы возможности применения нитрида титана (TiN) для получения высокодобротного поверхностного резонанса на периодической структуре сферических наночастиц. Полученные данные открывают перспективы для использования 2-D массивов из TiN наночастиц в качестве элементов оптических интегральных микросхем нового поколения.

V.I. ZAKOMIRNYI^{1,2}, V.S. GERASIMOV¹, A.E. ERSHOV^{1,3}

¹*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

²*Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

³*Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk*

TiN AS ALTERNATIVE PLASMONIC MATERIAL FOR PERIODIC STRUCTURES WITH NARROW RESONANCE

The paper proposed the possibility of using titanium nitride (TiN) for obtaining high-quality surface resonance on the periodic structure of spherical nanoparticles. The data obtained provide an opportunity of utilizing such structures in optical integral circuits of new generation.

В настоящее время весьма актуальным является исследование оптических свойств периодических структур из наночастиц, обладающих поверхностным плазмонным резонансом [1] в связи с возможностью использования этих объектов в качестве функциональных элементов оптических микросхем нового поколения, работающих в условия повышенных температур. Наиболее распространенными плазмонными материалами являются серебро (Ag) и золото (Au). В настоящее время нитрид титана (TiN) находит всё больше и больше применений в области плазмоники [2]. В настоящей работе методом связанных диполей исследованы оптические характеристики периодических массивов сферических наночастиц из нитрида титана. Перейдем к спектрам трансмиссии частиц, расположенных в кварце. На рис. 1а изображены

положения поверхностного резонанса (ПР) в зависимости от размера частиц и шага решетки для комнатной температуры $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Положения пиков ПР соответствуют спектральному диапазону оптических микросхем, использующихся в промышленности и технике сегодня (1260–1625 нм). Исследуемая структура позволяет получить высокодобротный резонанс ($Q \sim 280\text{--}350$) для любой длины волны в данном диапазоне за счет изменения геометрии решетки. Так увеличение радиусом от 118 до 150 нм, а периода решетки от 828 до 1022 нм позволяет без потерь изменить положение ПР на длине волны $\lambda = 1200$ нм до 1600 нм. Дальнейшее увеличение радиуса частиц и периода решетки приводит к деградации ПР. На рис. 1b показаны ПР для структур с такими же геометрическими параметрами, что и на рис. 1a, но для температуры $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что изменение температуры не влияет на положение ПР, однако снижается добротность (170–270).

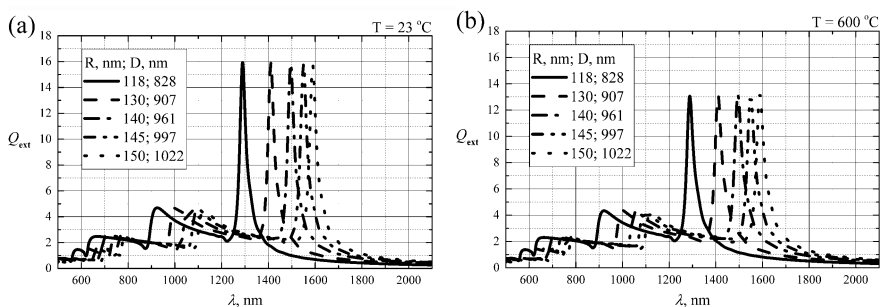


Рис. 1. Спектры экстинкции периодической структуры из сферических наночастиц TiN с радиусами R и периодом решетки D при температуре $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) и $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

Представленные спектры экстинкции позволяют считать, что рассматриваемые структуры можно применять в качестве узкополосных и высокочувствительных отражателей, что, несомненно, несет важную роль в их практическом применении. Высокая тепловая устойчивость нитрида титана является большим преимуществом в данном направлении.

Список литературы

1. Stockman M.I. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into the future // *Opt. Express*. 2011. V.19. P.22029.
2. Briggs J.A., Naik G.V., Petach T.A., Baum B.K., Goldhaber-Gordon D., Dionne J.A. Fully CMOS compatible titanium nitride nanoantennas // *Appl. Phys. Lett.* 2016. No.108 (5). P.051110.

М.Е. ПОПОВ, К.Д. ЖДАНОВА, Н.В. МИТЕТЕЛО,
Е.А. МАМОНОВ, Т.В. МУРЗИНА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В ОРГАНИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУРАХ

Исследованы кубичные нелинейные свойства неупорядоченного массива органических микрочастиц в виде микросфер и стержней. Спектр рассеянного нелинейного сигнала содержит третью оптическую гармонику и интенсивную трехфотонную флуоресценцию. Обнаружено усиление циркулярного дихроизма в нелинейном отклике таких структур, связанное с эффектами локализации оптического поля в структурах.

M.E. POPOV, K.D. ZHDANOVA, N.V. MITETELO,
E.A. MAMONOV, T.V. MURZINA

Lomonosov Moscow State University

THIRD-ORDER NONLINEAR EFFECTS IN ORGANIC MICROSTRUCTURES

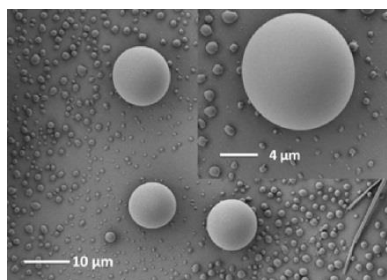
Third-order nonlinear-optical properties of a disordered array of organic microparticles in the form of microspheres and rods are studied. The spectrum of the scattered nonlinear signal contains optical third harmonic and intense three-photon fluorescence. The amplification of circular dichroism in the nonlinear response of such structures is associated with the effects of optical field localization in microstructures.

Развитие методов изготовления и изучение свойств микроструктур на основе органических соединений является перспективным направлением современной фотоники. Хотя органические структуры менее устойчивы по сравнению с неорганическими аналогичного дизайна, их преимуществом является относительно просто реализуемая возможность управления оптическими свойствами. Для таких структур была показана возможность возбуждения добротных мод шепчущей галереи (МШГ), что должно приводить к усилению оптических и нелинейно-оптических эффектов как в единичной микроструктуре, так и в их массиве [1].

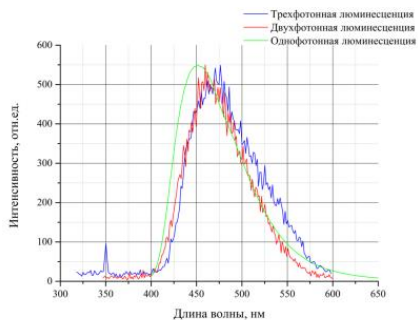
В данной работе исследованы нелинейно-оптические свойства микроструктур, полученных методом самоорганизации [2] из растворов органических красителей DCM и Vinol и имеющих форму сфер, полусфер

и стержней с характерными размерами 2-11 мкм; СЭМ изображение образца, состоящего из микросфер, приведено на рис. 1а. Большая величина показателя преломления [3] таких материалов в видимом и ближнем ИК диапазоне приводят к высокой локализации поля внутри микрочастиц, в том числе в МШГ.

При изучении кубических нелинейных эффектов в качестве накачки использовалось излучение иттербиевый лазер ТЕМА-200 Duo с длиной волны $\lambda = 1050$ нм, длительностью импульса $\tau = 160$ фс, и титан-сапфировый лазер ($\tau = 60$ фс, $\lambda = 730-890$ нм). Обнаружено, что при трехфотонном возбуждении в таких структурах наблюдается генерация третьей гармоники и трёхфотонная люминесценция (рис. 1б). Проявление хиральных свойств в нелинейном отклике было показано на примере дихроизма двухфотонного поглощения с помощью метода I-сканирования [4] и кругового дихроизма нелинейного сигнала, величина которого составила 10-15 %. что в 2 раза превышает величину аналогичного линейного эффекта для тонких плёнок того же состава. Данное усиление нелинейных эффектов в микроструктурах связано с увеличением локализации поля в микроструктурах за счет возбуждения в них МШГ.



а)



б)

Рис. 1. СЭМ изображение (а) и спектр трехфотонного возбуждения образца (б)

Список литературы

1. Venkatakrishnarao D. et al. // *Advanced Materials*. 2017. V.29 (15). P.1605260
2. Wang X. et al. // *Scientific reports*. 2014. V.4. P.7011.
3. Venkatakrishnarao D., Chandrasekar R. // *Advanced Optical Materials*. 2016. V.4(1). P. 112-119.
4. Taheri B. et al. // *Applied physics letters*. 1996. V68(10). P. 1317-1319.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, Л.В. ТЕРЕНИНА
Оренбургский государственный университет

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОИСТОГО НАНОКОМПОЗИТА В 2D И 3D РЕШЕТКАХ ИЗ ИДЕНТИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассчитаны оптические спектры слоистых композитных частиц с экситоногенной оболочкой и замагниченной металлической сердцевинкой, включенных в двумерные и пространственные сверхрешетки гексагональной и кубической симметрии. Обнаружены спектральные сдвиги полос экситонных и плазмонных резонансов, обусловленные взаимодействием частиц решетки друг с другом в приближении двух первых координационных сфер

M.G. KUCHERENKO, L.V. TERENINA
Orenburg State University

EFFICIENT POLARIZABILITY OF A SPHERICAL LAYERED NANOCOMPOSITE IN 2D AND 3D LATTICE FROM IDENTICAL ELEMENTS

Optical spectra of layered composite particles with an excitonogenic shell and a magnetized metal core included in two-dimensional and three-dimensional superlattices of hexagonal and cubic symmetry are calculated. Spectral shifts of the bands of exciton and plasmon resonances due to the interaction of the lattice particles with each other in the approximation of the two first coordination spheres are obtained

Частотные зависимости тензора $\tilde{\alpha}_{eff}(\omega)$ эффективной поляризуемости слоистого наноконкомпозита, включенного в бесконечную плоскую решетку гексагональной симметрии в приближении двух первых координационных сфер представляются выражением

$$\tilde{\alpha}_{eff}(\omega) = \left[\tilde{\mathbf{I}} - \alpha_0(\omega) \left(\sum_{j=1}^6 \tilde{\mathbf{G}}_j(a) + \sum_{j=3}^8 \tilde{\mathbf{G}}_{2j+1}(2a) + \sum_{j=4}^9 \tilde{\mathbf{G}}_{2j}(2h) \right) \right]^{-1} \alpha_0(\omega), \quad (1)$$

где $\alpha_0(\omega)$ – поляризуемость уединенной композитной наночастицы с сердцевинкой из диамагнитного металла и экситоногенной оболочкой [1]; $\tilde{\mathbf{G}}_j(\mathbf{r}) = (3\mathbf{n} \otimes \mathbf{n} - \tilde{\mathbf{I}})r^{-3}$ – тензор Грина квазистатического поля диполя;

$h = a\sqrt{3}/2$, a – параметры решетки. Из расчетов, проведенных на основе (1) установлено, что для поперечной поляризуемости наночастицы, находящейся в решетке, характерно смещение резонансов (экситонных и плазмонного) в низкочастотную область, тогда как для продольной – сдвиг в высокочастотную область спектра относительно резонансов для поляризуемости уединенного нанокомпозита (рис. 1). При этом амплитуды экситонных резонансов поперечной поляризуемости $\alpha_{eff}^{1,1}(\omega)$ увеличиваются, а амплитуды экситонных резонансов продольной поляризуемости $\alpha_{eff}^{3,3}(\omega)$ уменьшаются. Амплитуды плазмонных резонансов остаются практически одинаковыми для всех трех рассматриваемых поляризуемостей.

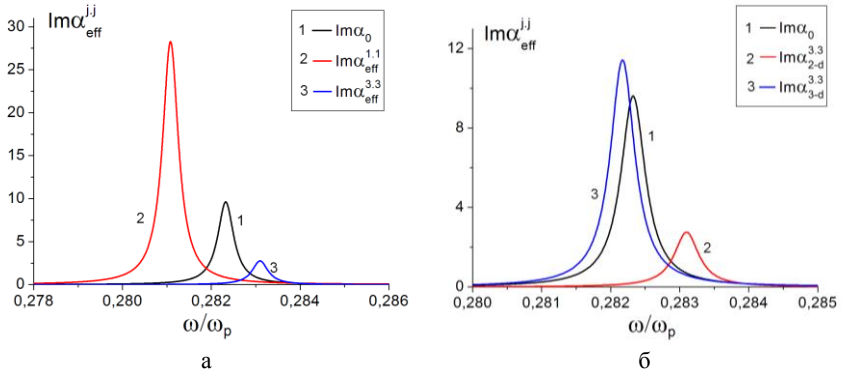


Рис. 1. Сдвиги спектров мнимых частей поперечной $Im\alpha_{eff}^{1,1}$ и продольной $Im\alpha_{eff}^{3,3}$ эффективных поляризуемостей слоистой наночастицы в плоской (а) и трехмерной (б; кр. 3) решетке, относительно поляризуемости $Im\alpha_0$ уединенной наночастицы.

$R_1 = 60$, $R_2 = 80$, $a = 180$ нм; $\gamma = 6 \cdot 10^{12}$, $\Gamma = 3 \cdot 10^{12}$, $\omega_p = 13,87 \cdot 10^{15}$, $\omega_{exc} = 4 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$

Тензор эффективной поляризуемости наночастиц, объединенных в трехмерную кубическую решетку был представлен в виде

$$\tilde{\alpha}_{eff}(\omega) = \left[\tilde{\mathbf{I}} - \alpha_0 \left(\sum_{j=1}^6 \tilde{\mathbf{G}}_j(a) + \sum_{k=7}^{18} \tilde{\mathbf{G}}_k(\sqrt{2}a) + \sum_{m=4}^{26} \tilde{\mathbf{G}}_m(\sqrt{3}a) \right) \right]^{-1} \alpha_0. \quad (2)$$

Список литературы

1. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M., Rusinov A.P., Terenina L.V. // The 4th Internat. Sympos. «Molecular photonics»-2016 dedic. acad. A.N. Terenin. Saint-Peterburg. 2016. P.21.

И.А. ДОЛГИХ, И.А. КОЛМЫЧЕК

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В МАССИВАХ ПЕРМАЛЛОЕВЫХ «С»-ОБРАЗНЫХ НАНОСТРУКТУР

Методом генерации второй оптической гармоники (ВГ) исследован круговой дихроизм, вызванный наведенной хиральностью в магнитных наноструктурах «С»-образной формы при приложении внешнего магнитного поля. Обнаружено, что усредненное по азимутальному углу значение кругового дихроизма ВГ в исследуемых образцах отлично от нуля вследствие нарушения симметрии структуры в присутствии намагнитченности. Таким образом показано, что с помощью приложения магнитного поля можно управлять оптической активностью ахиральных структур.

I.A. DOLGIKH, I.A. KOLMYCHEK

Lomonosov Moscow State University

THE GENERATION OF OPTICAL SECOND HARMONIC IN PERMALLOY «C»-SHAPED NANOSTRUCTURES ARRAYS

The circular dichroism induced by the extrinsic chirality in the magnetic "C" - shaped nanostructures with the application of an external magnetic field was investigated by the optical second harmonic generation (SHG) method. Discovered, that the averaged over all azimuthal sample' SHG circular dichroism in the studied samples is nonzero due to the symmetry breaking of the structure in the presence of magnetization. Thus, the possibility to control the optical activity of achiral structures by the application of a magnetic field was shown.

Нанофотоника является актуальной областью науки, что связано с развитием новых прецизионных методов изготовления и характеристики наноструктур различного дизайна. Интерес представляет разработка и оптимизация функциональных метаматериалов для эффективного контроля параметров (спектрального состава, интенсивности, поляризации, направленности) света. В рамках указанной тематики создание и изучение оптически активных структур, в которых путем приложения внешнего статического магнитного поля возможно управление параметрами светового излучения является важной задачей.

Работа посвящена изучению магнитооптического отклика упорядоченных массивов пермалловых наноструктур, имеющих форму буквы «С». Структуры были изготовлены методом литографии в Национальном Университете Сингапура. Элементы из пермаллоя толщиной 50 нм и размерами 0,5x0,8 мкм расположены в узлах квадратной решетки с периодом около 1 мкм на кремниевой подложке.

Форма элементов обуславливает анизотропию магнитных и магнитооптических свойств образцов. Дизайн выбран таким образом, что структура обладает зеркальной симметрией, но в таких образцах возможно проявление так называемой наведенной хиральности («extrinsic chirality») в геометрии эксперимента, когда плоскость падения не будет совпадать с плоскостью симметрии массива [1]. В таком случае возможно появление оптической активности - вращение плоскости поляризации и оптический круговой дихроизм, который определяется как относительная разность интенсивностей отклика при левом и правом циркулярно поляризованном зондирующем излучении. Известно, что нелинейно-оптический отклик более чувствительный к симметрии структуры, чем линейный [2], поэтому в генерации второй гармоники (ВГ) эффекты, обусловленные наведенной хиральностью, проявляются сильнее.

Эксперимент проводился с помощью фемтосекундного (длительность импульса 100 фс, частота 80 МГц) титан-сапфирового лазера на длине волны 800 нм. Регистрировался отраженный сигнал ВГ (400 нм). Получены зависимости величины кругового дихроизма ВГ $CD_{2\omega}$ от азимутального положения образца ψ и постоянном угле падения света (45^0) как без внешнего магнитного поля, так и с разными ориентациями магнита относительно структуры. В отсутствие намагниченности наблюдались зависимости циркулярного дихроизма от ψ , среднее значение которого по обороту равно нулю вследствие ахиральности структуры. Однако, приложение магнитного поля определенной ориентации нарушает симметрию, среднее значение дихроизма в таком случае составляет 5-6% и меняет знак при изменении полярности магнита. Распределение намагниченности в образцах при экспериментальных ориентациях магнита и петли гистерезиса были рассчитаны в программе Object Oriented Micromagnetic Framework. Таким образом, показано, что с помощью внешнего магнитного поля можно управлять оптической активностью магнитных ахиральных наноструктур.

Список литературы

1. Plum E., Liu X.-X., Fedotov V.A., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V.102. P.113902.
2. Valev V.K., Baumberg J.J., Sibilica C., Verbiest T. // Adv. Mater. 2013. V.25. P.2517–2534.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, Т.М. ЧМЕРЕВА
Оренбургский государственный университет

МАГНИТНЫЙ КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ НАНОЧАСТИЦ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ КОРОМ И ДИАМАГНИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Рассчитаны магнитные дихроичные спектры поглощения циркулярно-поляризованного света композитными металлическими наночастицами со структурой «кор-оболочка». Дихроизм оптического поглощения такой системы обусловлен остаточной намагниченностью ферромагнитного ядра композита, неоднородное поле которого изменяет и диэлектрическую проницаемость электронной плазмы проводящей оболочки.

M.G. KUCHERENKO, T.M. CHMEREVA
Orenburg State University

MAGNETIC CIRCULAR DICHROISM OF OPTICAL ABSORPTION OF BIMETALLIC LAYER NANOPARTICLES WITH FERROMAGNETIC CORE AND DIAMAGNETIC SHELL

Magnetic dichroic absorption spectra of circularly polarized light were calculated by composite metal nanoparticles with a "shell-shell" structure. The dichroism of the optical absorption of such a system is due to the residual magnetization of the ferromagnetic core of the composite, whose heterogeneous field also changes the dielectric constant of the electron plasma of the conducting shell.

Дипольная электрическая поляризуемость частицы в переменном монохроматическом поле $E(i\omega t)$ зависит от намагниченности материала, из которого она состоит. В случае слоистых нанокомпозитов со структурой «ферромагнитный кор – проводящая (диамагнитная) оболочка», их спектры оптического поглощения обладают круговым дихроизмом. Тензор $\varepsilon_{mm}^{(1)}(\omega)$ диэлектрической проницаемости однородно намагниченного кора может быть записан в виде $\varepsilon_{mm}^{(1)}(\omega) = \varepsilon_f(\omega)[\delta_{m1} + iQ(-\delta_{m1}\delta_{n2} + \delta_{m2}\delta_{n1})]$, где Q – параметр Фохта ферромагнетика, $\varepsilon_f(\omega) = 1 - \omega_{pl}^2 / [\omega(\omega + i\gamma_f)]$, а ω_{pl}, γ_f – его плазменная частота и коэффициент диссипации, соответственно. Проводящая оболочка композита из диамагнитного металла (Au, Ag) с намагниченной

электронной плазмой, в поле с индукцией $\mathbf{B}(r, \theta)$, создаваемом кором, характеризуется тензором диэлектрической проницаемости $\epsilon_{mm}^{(2)}(\omega | \mathbf{B}(r, \theta))$. Тогда спектр $W^{(\pm)}(\omega)$ скорости поглощения циркулярно поляризованного света с амплитудой $E_0^{(\pm)}(\omega)$ напряженности $E(i\omega t)$ может быть записан в виде суммы двух интегралов – в области кора ($0 < r < R_1$), и в области диамагнитного слоя ($R_1 < r < R_2$)

$$\omega^{-1}W^{(\pm)}(\omega) \sim \int_0^{R_1} \text{Im} \mathbf{E}_1^{(\pm)}(\omega) \tilde{\epsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) \mathbf{E}_1^{(\pm)}(\omega) d^3 r + \int_{R_1}^{R_2} \text{Im} \mathbf{E}_2^{(\pm)}(\omega) \tilde{\epsilon}_2(\omega | \mathbf{B}(r, \theta)) \mathbf{E}_2^{(\pm)}(\omega) d^3 r, \quad (1)$$

где $\tilde{\epsilon}_{1,2}(\omega | \mathbf{M} / \mathbf{B})$ - тензоры диэлектрической проницаемости в соответствующих частях композита, зависящие от векторов намагниченности \mathbf{M} , или индукции \mathbf{B} магнитного поля. В нулевом приближении замагниченность электронной плазмы проводящего слоя может не учитываться.

Расчеты спектров $\Delta W(\omega) = W^{(+)}(\omega) - W^{(-)}(\omega)$ магнитного кругового дихроизма (МКД) ряда сферических слоистых нанокомпозитов с различными сочетаниями материалов кора и оболочки были произведены на основе (1), а также на базе других выражений, использующих тензорное представление дипольной динамической поляризуемости композитов. Обнаружены сильные зависимости спектров $\Delta W(\omega)$ МКД от сочетаний металлов композитов и радиусов кора и оболочки (рис. 1). Радиус ферромагнитного ядра $R_1 = 6$ нм, внешний радиус нанокомпозита – $R_2 = 10$ нм. Au: $\epsilon_\infty = 6,5 - 9,8$; Ag: $\epsilon_\infty = 3,7 - 4,45$. Параметр Q Фохта варьировался от 10^{-2} до $5 \cdot 10^{-2}$. $\epsilon_2 = \text{const}$. Для Co: $\gamma_f = 9,6 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$; $\omega_{pl} = 1,48 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$.

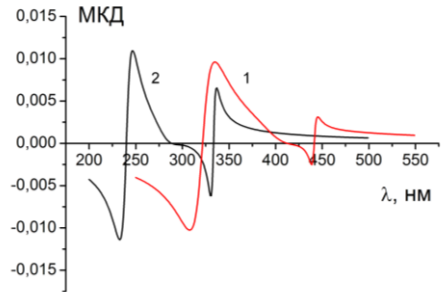


Рис. 1. Спектры МКД наночастиц с кобальтовым ядром и оболочками из золота (1) и серебра (2), $\omega_{pl} = 1,37 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$; $\gamma = 4,1 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ^{1,2}, С.Н. НЕСМЕЛОВ¹, С.М. ДЗЯДУХ¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Сибирский физико-технический институт ТГУ

ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНЫХ МДП-ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО HgCdTe, ВЫРАЩЕННОГО МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДЛОЖКАХ

При различных напряжениях и частотах экспериментально определены значения дифференциального сопротивления области пространственного заряда для МДП-структур на основе МЛЭ Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.21-0.23$), выращенного на подложках из Si и GaAs. Проведены оценки величины пороговой мощности и обнаружительной способности равновесных МДП-детекторов в режиме ограничения шумами фонового излучения, а также при доминировании теплового шума активного сопротивления структуры. Установлено, что лучшие характеристики инфракрасных детекторов обеспечивают эпитаксиальные пленки *n*-HgCdTe, выращенные на подложках из GaAs.

A.V. VOITSEKHOVSKI^{1,2}, S.N. NESMELOV¹, S.M. DZYADUKH¹

¹National Research Tomsk State University

²Siberian Physical-Technical Institute of the Tomsk State University

THRESHOLD CHARACTERISTICS OF MIS-PHOTODETECTOR BASED ON GRADED-GAP HgCdTe GROWN BY MOLECULAR-BEAM EPITAXY ON ALTERNATIVE SUBSTRATES

At different voltages and frequencies, the values of the differential resistance of the space-charge region for MIS structures based on MBE Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.21-0.23$) grown on Si and GaAs substrates were experimentally determined. The noise equivalent power (NEP) and the specific detectivity of equilibrium MIS detectors in a BLIP mode (background-limited infrared performance), as well as with the dominance of the thermal noise of the active resistance of the structure were estimated. It is established that the best characteristics of infrared detectors are provided by epitaxial *n*-HgCdTe films grown on GaAs substrates.

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор HgCdTe широко применяется для создания высокочувствительных детекторов, действующих в различных областях инфракрасного диапазона. Наибольшее распространение получили гибридные матрицы фокальной

плоскости на основе фотодиодов из HgCdTe. Детекторы на основе МДП-структур из HgCdTe активно разрабатывались в начале 1980-х годов из-за возможностей создания монокристаллических матричных детекторов (ПЗС, ПЗИ) инфракрасного диапазона. Проблемами при создании приборов на основе HgCdTe, полученного объемными методами, являлись большие темновые токи, нестабильность и неоднородность свойств. Новый этап в развитии детекторов на основе HgCdTe связан с развитием метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Появляются работы, посвященные разработкам дискретных МДП-детекторов на основе эпитаксиального HgCdTe [1, 2].

Целью работы является расчет пороговой мощности и обнаружительной способности равновесных МДП-детекторов на основе МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.21-0.23$) с приповерхностными варизонными слоями.

Важнейшей характеристикой равновесного МДП-фотоприемника является произведение дифференциального сопротивления области пространственного заряда на площадь полевого электрода ($R_{\text{опз}}A$). Значения произведения $R_{\text{опз}}A$ в режиме сильной инверсии определялись из экспериментальных зависимостей адмиттанса МДП-структур при различных частотах и температурах [3, 4]. Установлено, что при температуре 77 К наибольшие значения произведения $R_{\text{опз}}A$ для МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te/GaAs}$ с варизонными слоями наблюдаются при частотах (1-50) кГц и составляют (55-80) Ом \times см². Для МДП-структур на основе HgCdTe/Si значения $R_{\text{опз}}A$ меньше из-за высокой дефектности пленки. Выражение для пороговой мощности МДП-детекторы в равновесном режиме было получено при помощи метода эквивалентных схем. При длине волны около 10.5 мкм и квантовой эффективности, равной 0.5, пороговая мощность лучших МДП-детекторов в случае ограничения тепловым шумом активного сопротивления структуры ($R_{\text{опз}}$) составляет около 1.23×10^{-12} Вт/Гц^{0.5}. Удельная обнаружительная способность при площади 1.55×10^{-3} см² будет близка к 3.2×10^{10} см \times Гц^{0.5}/Вт. Определен диапазон рабочих температур МДП-детекторов, при которых реализуется режим ограничения фоном.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области (научный проект р_а № 16-42-700759).

Список литературы

1. Kesler V.G., Guzev A.A., et. al. // Phys. Stat. Sol. C. 2016. V.13 (7-9). P.643-46
2. Damjanovic V., Ponomarenko V.P., Elazar J.M. // Semicond. Sci. Technol. 2008. V.24 (2). P.025003.
3. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., et. al. // Russ. Phys. J. 2017. V.60 (2). P.360-370.
4. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., et. al. // Infrared Phys. Technol. 2015. V.71. P.236-241.

С.В. АВЕРИН, П.И. КУЗНЕЦОВ, В.А. ЖИТОВ,
Л.Ю. ЗАХАРОВ, В.М. КОТОВ

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZnSe/ZnTe/GaAs ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ И МПМ-ФОТОДЕТЕКТОРА НА ЕЕ ОСНОВЕ

Исследованы структурные, оптические и электрические свойства ZnSe/ZnTe/GaAs гетероструктуры и МПМ-диода на её основе. Для МПМ-диода с шириной встречно-штыревых контактов 2.8 мкм, зазором между ними 2.8 мкм и общей площадью фоточувствительной области детектора 100x100 мкм² плотность темнового тока при комнатной температуре составляет 10⁻⁸ А/см². Фотоотклик МПМ-детектора демонстрирует три пика реакции, расположенные на длинах волн 510, 620 нм и 870 нм.

S.V. AVERIN, P.I. KUZNETZOV, V.A. ZHITOV,
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV

Fryazino branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

ELECTRICAL, OPTICAL AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF ZnSe/ZnTe/GaAs HETEROSTRUCTURE AND MSM-PHOTODETECTOR ON ITS BASE

Structural, optical and electrical characteristics of ZnSe/ZnTe/GaAs heterostructure and MSM-photodetector on its base have been investigated. Dark current density of the MSM-diode with finger width and gap of 2.8 μm and 100x100 μm² photosensitive area is equal to 10⁻⁸ A/cm² at room temperature. Spectral characteristic of detector demonstrates three peaks of response located at 510, 620 and 870 nm.

Гетероструктура выращена методом МOCVD путем последовательного осаждения (stacking approach) двенадцати пар слоев ZnSe (15 нм)/ ZnTe (1,8 нм) на полуизолирующей GaAs подложке (300 мкм). Сверху структуры выращивался тонкий покровный слой ZnSe. Состав и толщины отдельных слоев определены методами энергодисперсионного анализа, рамановской спектроскопии и *in situ* рефлектометрии, а оптические свойства изучены по спектрам фотолуминесценции. Качество ростовой поверхности оценено с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе SmartSPM (AIST-NT).

Шероховатость ростовой поверхности $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ составила $\sim 15 \text{ нм}$. На выращенной гетероструктуре методами фотолитографии были сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-детектора с шириной контактов 2.8 мкм , расстоянием между ними 2.8 мкм и общей площадью фоточувствительной области детектора $100 \times 100 \text{ мкм}^2$. В качестве металла барьера контакта Шоттки использовалась пара Ni-Au. Измерение ВАХ показало, что детектор на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe обладает низкими темновыми токами даже при больших напряжениях смещения. При смещении 40 В темновой ток диода составляет 10^{-12} А , что на два порядка величины меньше, чем у AlGaIn МПМ-детектора с той же геометрией контактов [1].

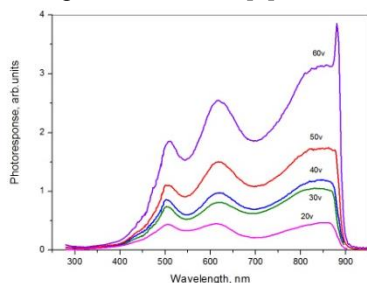


Рис. 1. Спектральный отклик МПМ-детектора

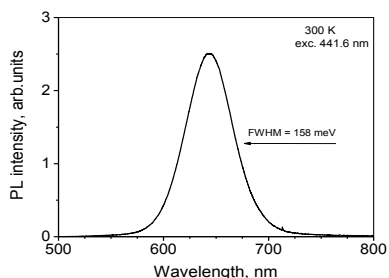


Рис. 2. Спектр сигнала PL сверхрешетки ZnSe/ZnTe

Спектральная характеристика МПМ-диода (рис. 1) демонстрирует возможность детектирования трех отдельно стоящих длин волн излучения видимого и инфракрасного участка спектра на одной фотодиодной структуре. Отклик детектора на 620 нм почти совпадает с сигналом фотолюминесценции сверхрешетки ZnSe/ZnTe (рис. 2). Увеличение смещения с 20 до 50 В приводит к сдвигу максимальной фоточувствительности на длину волны $\sim 870 \text{ нм}$ с последующим резким спадом. При больших смещениях удается исключить блокирующее действие гетеробарьера на границе раздела ZnSe/GaAs и детектор обеспечивает эффективный сбор фотоносителей из низлежащего GaAs. Отклик МПМ-диода на длине волны 620 нм соответствует ампер-ваттной чувствительности 0.2 А/Вт и внешней квантовой эффективности $\text{EQE} = 38\%$. С учетом потерь 50% излучения за счет отражения от встречно-штыревых контактов диода, внутренняя квантовая эффективность детектора близка к теоретической.

Список литературы

1. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., et al. // Solid State Electronics. 2008. V.52. P.618.

В.Н. ДАВЫДОВ, В.С. СОЛДАТКИН, О.А. КАРАНКЕВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

РЕЗИСТИВНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ГЕТЕРОСТРУКТУР

Предложен метод профилирования, основанный на измерениях сопротивления полупроводникового прибора. Получены выражения для профиля концентрации электронов, как по методу емкостного профилирования, так и по методу резистивного профилирования. Экспериментальные исследования, выполненные на диффузионных р-п переходах, показали применимость резистивного профилирования, как концентрации носителей заряда, так и времени их жизни.

V.N. DAVYDOV, V.S. SOLDATKIN, O.A. KARANKEVICH

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

RESISTIVE PROFILING AS RESEARCH TECHNIQUE OF AN SEMICONDUCTOR'S DEVICES AND HETEROSTRUCTURES

The profiling method based on measurements of resistance of a semiconductor device is offered. Expressions for an electron concentration profile, both by a method of capacitor profiling, and by a method of resistive profiling are received. The experimental investigations executed on diffusion p-n transitions showed applicability of resistive profiling, both concentration of charge carriers, and time of their life.

В настоящее время для исследования свойств полупроводниковых приборов и гетероструктур широко применяется метод емкостного профилирования. Однако этот метод не регистрирует медленные процессы в полупроводнике. Для получения информации об изменениях структурного состояния прибора, процессах взаимодействия носителей заряда с решеткой, исследования генерационно-рекомбинационных и деградационных свойствах гетероструктур необходимы низкочастотные измерения. Ими могут быть исследования резистивных свойств, которые определяют из низкочастотной вольт-сименной характеристики.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей резистивного профилирования для исследования свойств р-п переходов, гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ), а также экспериментальное определение профиля концентрации носителей из резистивных свойств и

его сравнение с результатами емкостного профилирования. Отмечено, что если емкостной метод дает ограниченный объем информации, то резистивный потенциально более информативен, но требует более сложной обработки экспериментальных данных.

В работе получены аналитические выражения для профилей концентраций носителей заряда, определяемые как из емкостных, так и резистивных измерений импеданса с учетом числа КЯ, их параметров и местоположения. В обоих методах исследования гетероструктур на экспериментальных вольт-сименсных и вольт-фарадных характеристиках квантовые ямы проявляются в виде ступеньки, возникающих при их перезарядке свободными носителями. Дифференцирование этих характеристик по напряжению приводит к появлению максимумов концентрации носителей заряда, обнаруживаемых при перезарядке КЯ.

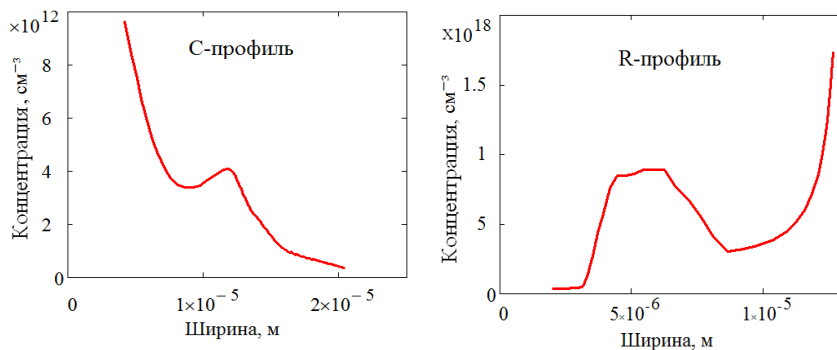


Рис. 1. Профиль концентрации электронов в транзисторе КТ 361Е

Экспериментальное измерение емкости и дифференциального сопротивления диффузионных р-п переходов и гетероструктур, изготовленных на основе барьеров InGaN/GaN, по методам резистивного и емкостного профилирования позволило сравнить профили концентраций свободных носителей заряда (рис. 1). Оно показало работоспособность резистивного метода, а также перспективность его совместного применения с методом емкостного профилирования.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

М.А. МОШКОВА^{1,2}, А.В. ДИВОЧИЙ², П.В. МОРОЗОВ²,
Ф.И. ЗОЛОТОВ^{1,2}, Ю.Б. ВАХТОМИН^{2,3}, К.В. СМИРНОВ^{1,2,3}

¹Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики», Москва

²ООО «СКОНТЕЛ», Москва

³Московский педагогический государственный университет

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ NBN ОДНОФОТОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С РАЗРЕШЕНИЕМ ЧИСЛА ФОТОНОВ

Разработаны и исследованы сверхпроводниковые однофотонные детекторы, способные к разрешению до 3-х фотонов в коротком импульсе излучения и имеющие квантовую эффективность детектирования одиночных фотонов ~60% на длине волны $\lambda=1.55$ мкм. Проведенная модернизация технологии изготовления детекторов, позволила получить приемные устройства с мультифотонной квантовой эффективностью, приближающейся к расчетным значениям.

M.A. MOSHKOVA^{1,2}, A.V. DIVOCHIY², P.V. MOROZOV²,
P.I. ZOLOTOV^{1,2}, Yu.B. VAKHTOMIN^{2,3}, K.V. SMIRNOV^{1,2,3}

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow

²LLC «SCONTEL», Moscow

³Moscow State University of Education

HIGH-EFFICIENCY NBN SINGLE-PHOTON DETECTORS WITH PHOTON NUMBER RESOLUTION FUNCTIONALITY

We developed and investigated superconducting single-photon detectors capable of resolving up to 3 photons in short optical pulse. Single-photon detection efficiency of such devices was ~60%. Conducted modernization of devices fabrication technology allowed to obtain detectors with multi-photon detection efficiencies similar to those are expected from calculated values.

Значительное развитие технологий SSPD (SSPD – Superconducting Single-Photon Detector) [1-2] привело к созданию одноэлементных сверхпроводниковых однофотонных детекторов, демонстрирующих предельные характеристики, в частности приближающуюся к 100 % эффективность детектирования [3-5]. Однако для некоторых применений важным является определение числа фотонов в коротком оптическом импульсе, поэтому дальнейшее перспективное развитие SSPD технологии может быть связано с разработкой многоэлементных детекторов, способных к разрешению числа фотонов.

Нами были разработаны, созданы и исследованы детекторы, различающие число фотонов в коротком импульсе излучения (PNR SSPD, от photon number resolving detectors) [6] способные к обнаружению до 3-х фотонов. Измеренная квантовая эффективность обнаружения одиночных фотонов (QE_1) таких детекторов составила $60 \pm 3\%$ на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Также нами были проведены измерения эффективностей детектирования n-фотонных импульсов (QE_n , где $n = 2 \div 3$). Проведенные исследования показали, что вероятности срабатываний могут быть существенно ниже ожидаемых в соответствии с расчетным выражением мультифотонной эффективности $QE_n = QE_1^n$ (рис. 1, образцы #198, #921). Эти отклонения мы связали с: а) неоднородностью согласования излучения со сверхпроводниковой структурой, вызванной топологией используемого образца и пространственной неоднородностью излучения, подчиняющегося распределению Гаусса, на выходе используемого нами одномодового волокна; б) неоднородностью распределения тока смещения в сверхпроводниковой структуре. Усовершенствование топологии PNR SSPD позволило почти полностью устранить указанные недостатки и получить PNR SSPD с близкими значениями экспериментальных и расчетных QE_n (рис. 1, образец #261).

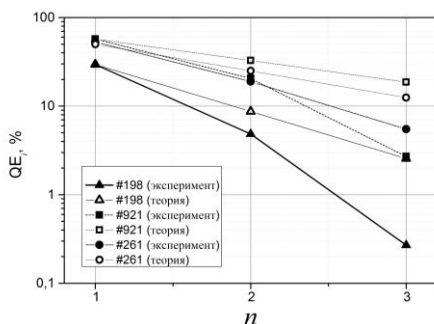


Рис. 1. Зависимости измеренной (сплошные символы) и рассчитанной (открытые символы) мультифотонной эффективности $QE_n(n)$ для трех PNR SSPD

Список литературы

- Gol'tsman G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V.79. P.705.
- Yamashita T., et al. // IEICE Transactions on Electronics. 2017. V.100(3). P.274-282.
- Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Yu., et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V.109. P.052601.
- Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Yu., et al. // arXiv preprint arXiv: 1709.07686. 2017.
- Sidorova M., Divochiy A., Vakhtomin Yu., Smirnov K. // Nanophotonics. 2015. V.9. P.093051.
- Divochiy A., et al. // Nature Photonics. 2008. 2.5. P.302-306.

В.Н. ДАВЫДОВ, О.А. КАРАНКЕВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ЗАХВАТ И ЭМИССИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА КВАНТОВОЙ ЯМОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматривается взаимодействие электронов из барьерного слоя светодиодной гетероструктуры с уровнем размерного квантования квантовой ямы, описываемое временем захвата и временем эмиссии носителей заряда. Релаксация избыточной энергии при захвате и эмиссии носителей заряда описывается как результат их столкновений с фононами объема вещества квантовой ямы и межфазными границами раздела. Получены выражения для времен взаимодействия с учетом глубины залегания уровня размерного квантования, участвующего во взаимодействии с электронами и ширины ямы. Численные оценки показывают, что в реальных условиях время захвата меньше времени эмиссии и это различие увеличивается с ростом глубины залегания уровня.

V.N. DAVYDOV, O.A. KARANKEVICH

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

CAPTURE AND EMISSION OF CARRIERS OF THE CHARGE OF A QUANTUM WELL OF A SEMICONDUCTOR SOURCE OF OPTICAL RADIATION

The interaction of electrons from a barrier layer of LED heterostructure with the level of dimensional quantization of a quantum well described by time of capture and time of an emission of charge carriers is considered. The relaxation of excess energy at capture and issue of charge carriers is described as result of their collisions with phonons of volume of substance of a quantum well and interfaces of the section. Expressions for interaction times taking into account a depth of level of the dimensional quantization participating in interaction with electrons and well width are received. Numerical estimates show that in actual practice time of capture is less than time of an emission and this distinction increases with body height of a depth of level.

Важными параметрами светодиодных гетероструктур (ГС) с квантовыми ямами (КЯ), определяющими эффективность преобразования электрической энергии в световую, являются времена захвата и эмиссии носителей заряда КЯ. Знание этих параметров важно как для понимания формирования тока инжекции в ГС, так и путей повышения мощности излучения когерентных и некогерентных источников света.

Целью данной работы является построение физической картины захвата и эмиссии носителей заряда квантовой ямой, а также получение аналитических выражений для определения времени захвата свободных носителей заряда, времени эмиссии носителей из квантовой ямы и установление соотношения между ними.

Схема взаимодействия носителей заряда с квантовой ямой показана на рис. 1. В рамках каскадной модели взаимодействия носителей и дефектов в квантовой яме получены аналитические выражения для времени захвата $\tau_{зах}$ и времени эмиссии электронов из КЯ $\tau_{эм}$, в которых учтены вероятности различных исходов столкновения носителей заряда с акустическими фононами в объеме КЯ и межфазными границами ГС, а также различия в длинах свободного пробега носителей, движущихся вдоль и перпендикулярно межфазной границе.

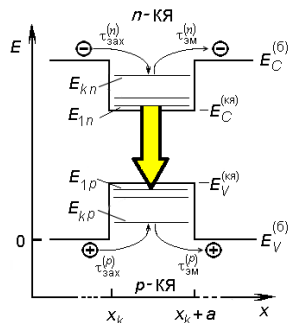


Рис. 1. Взаимодействия носителей и КЯ

Численные оценки, выполненные для ГС на основе InGaN/GaN, показали, что для реальных ситуаций время захвата носителей ямой меньше времени их эмиссии из ямы. Различие во временах задается соотношением толщины КЯ и длины свободного пробега в объеме, а также энергии заполняемого уровня размерного квантования. Оно увеличивается по мере увеличения глубины залегания уровня размерного квантования, взаимодействующего с электронами из зоны проводимости барьера или дырками из его валентной зоны. При малых глубинах залегания времена захвата и эмиссии сопоставимы, что указывает на необходимость учета эмиссионных свойств КЯ в формировании тока светодиодной ГС.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0266.

Список литературы

1. Соколова З.Н., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С. Асрян Л.В. // ФТП. 2016. Т.50. Вып.5. С.679-682.
2. Yan D., Lu H., Chen D., Zhang R., Zheng Y. // Appl. Phys. Lett. 2010. V.95. P.083.

О.Э. БАБКИН, А.А. МЕЛИДИНА, В.В. ИЛЬИНА, Л.А. БАБКИНА¹
Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
¹*ООО «S@H Technology», Санкт-Петербург*

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ФОТОПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Оптические кабели уже широко используют в технологиях связи, и их производство в России с использованием отечественных материалов является стратегически важным для отечественной экономики. В работе представлены результаты разработки в области создания покрытий оптического волокна.

О.Е. BABKIN, A.A. MELIDINA, V.V. IL'INA, L.A. BABKINA¹
Saint-Petersburg State University of Film and Television
¹*S@H Technology Ltd., Saint-Petersburg*

RUSSIAN PHOTOPOLYMER MATERIAL FOR PRODUCTION OF OPTIC CABLES

Optic cables are already used in communication technologies, and their production in Russia using own materials is strategically important for the Russian economy. The paper presents the results of the development of optical fiber coatings.

Востребованность оптических кабелей в технологиях связи обусловлена их уникальными эксплуатационными характеристиками, в основном – огромной пропускной способностью материала, информационная емкость которого несоизмерима с его геометрией. В основе технологии передачи информации по оптическим кабелям лежит передача электромагнитных волн по защищенному стекловолокну по принципу полного внутреннего отражения.

Стекловолокну, представляющее собой «начинку» оптического кабеля, вытягивается на специальных установках, и представляет собой полуфабрикат, нуждающийся не только в стабильной защите, но и в нанесении непрозрачного слоя для обеспечения внутреннего отражения, а также в цветовой маркировке для идентификации при составлении систем. Технологически, защитная оболочка стекловолокну создается с использованием фотополимерных материалов, которые позволяют «одевать» чувствительный к внешним воздействиям материал в механически более прочную обложку в режиме реального времени. Технология фотополимеризации обеспечивает скорость процесса до 1000-1500 м/мин. при использовании жидких композиций на основе акрилатов.

Процесс нанесения защитного и последующего колористического покрытий на стекловолокно осуществляется методом «мокрый по мокрому», и определяющими параметрами при составлении рецептур являются вязкость композиций, которая существенно отличаются для внутреннего и внешнего покрытий, и их реактивность. Требования к последовательно формируемым покрытиям также существенно разнятся: внешнее покрытие должно быть более прочным и упругим, а внутреннее защитное – более эластичным, при этом обладающим высокой адгезией к стекловолокну. Важна и толщина покрытий – для необходимой защиты она должна превышать 100 мкм.

Технология UV-отверждения позволяет получать подобные покрытия на различных пленкообразователях, в том числе на полиэфиракрилатах, уретанакрилатах, эпоксиакрилатах, выбор которых определяется назначением покрытия и преобладающей эксплуатационной характеристикой (химическая стойкость, эластичность, прочность на истирание или др.) [1]. При этом ограничением применения UV-отверждения является сложность получения качественных толстослойных покрытий. Для этой цели целесообразнее применять технологию UV LED-отверждения, использующую источники с узким диапазоном излучения 395 - 410 нм. Авторами получены результаты, подтверждающие эффективность применения технологии UV LED-отверждения для получения покрытий толщиной до 300 мкм, что доказано методами спектроскопии комбинационного рассеяния на примере композиций с алифатическими уретанакрилатами. Анализ степени конверсии двойных связей по глубине формируемого покрытия показал, что принципиально возможно получение толстослойных покрытий с удовлетворительной адгезией (до 4 Н/мм²) при экспозиции LED-источником в течение 30 с, что может обеспечить общую скорость вытяжки оптического волокна с покрытием до 1000 м/мин.

В работе исследованы рецептуры композиций на основе алифатического уретанового акрилата в смеси с меркаптомодифицированным полиэфиракрилатом, этоксилированным триметилпропантриакрилатом и полипропиленгликольмоноакрилатом с добавкой промоутера адгезии - двухфункциональной адгезионной смолы и фотоницирующей системы: бензофенона, 2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфиноксида и α -гидроксикетонов.

Список литературы

1. Бабкин О.Э., Ильина В.В., Бабкина Л.А., Сиротина М.В. Покрытия ультрафиолетового отверждения для функциональной защиты // Журнал прикладной химии.2016. Т.89. Вып.1.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск

ПОЛИМЕРНЫЕ СЛОИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР С УПРАВЛЯЕМЫМИ ВОЛНОВОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Предложен новый фотосшиваемый полимер для создания слоев с управляемыми с помощью ЖК волноводными характеристиками. Исследованы волноводные свойства слоев, измерен показатель преломления материала (1,59) и коэффициент затухания для $\lambda = 0,633$ нм (~ 1 дБ/см). Показана возможность нанесения на волновод слоев - ориентантов ЖК.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH
Belarusian State University, Minsk

POLYMERIC LAYERS FOR OPTICAL STRUCTURES WITH CONTROLLABLE WAVEGUIDE PARAMETERS

A new photo-crosslinkable polymer is proposed for creating layers with LC controlled waveguide characteristics. The waveguide properties of the layers were investigated, the refractive index of the material (1.59) and the attenuation coefficient for $\lambda = 0.633$ nm (~ 1 dB / cm) were measured. The possibility of LC alignment layers deposition on the waveguide is demonstrated.

При контакте поверхности волноводной структуры с жидким кристаллом (ЖК), ориентация которого изменяется электрическим полем, создается возможность управлять параметрами мод планарных волноводов. Для них необходимы материалы, показатель преломления которых выше обыкновенного показателя преломления ЖК ($\approx 1,53$ для $\lambda = 0,633$ нм). Кроме того, свободная поверхность волновода должна быть ориентантом для ЖК и, если ориентация может быть сделана многодоменной (с изменяющимся локально направлением директора), то на ее основе можно формировать полосковые волноводы и интегрально-оптические схемы. Высокорепрафрактивные слои фотоотвержденного ЖК мономера [1] трудно сделать достаточно однородными. По нашим измерениям коэффициент затухания в них > 50 дБ/см. Высокой однородностью и меньшим затуханием характеризуются обычно изотропные слои стеклообразных полимеров.

Нами синтезирован новый высокорефрафрактивный полимер с высоким содержанием фенильных и дифенильных групп, включающий также

фоточувствительные бензальдегидные фрагменты. Последние обеспечили фотосшивание материала под действием УФ излучения, т.е. превращение его в сетчатый полимер, устойчивый к действию органических растворителей. Это позволило без разрушения волноводного слоя наносить на его поверхность тонкие (~ 50-100 нм) слои бензальдегидных ориентантов, как планарных, так и градиентных [2].

В табл. 1 представлены результаты измерения методом темных m-линий волноводных показателей преломления N_{TE} мод полимерного слоя в отсутствие и в присутствии ориентирующих слоев, а также рассчитанный по этим данным показатель преломления n нового материала.

Таблица 1. Параметры полимерных волноводов

Тип волновода	Номер моды	N_{TE}	n	Тип волновода	Номер моды	N_{TE}	n
Слой нового полимера	1	1,572	1,591	Слой полимера с двумя градиентными ориентирующими слоями	1	1,570	1,588
	2	1,548			2	1,547	
	3	1,519			3	1,517	

Для $\lambda = 0,633$ нм $n > 1,53$ в достаточной степени, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение в широком диапазоне ориентаций директора жидкого кристалла. Даже два последовательно нанесенных ориентирующих слоя существенно не изменяют характеристик волновода, что позволяет формировать на его поверхности фоторельефы с многодоменной ориентацией [3]. Применение ориентантов градиентного типа также создает возможность задавать распределение углов преднаклона ЖК на поверхности волноводного слоя для формирования полосковых волноводных схем. Коэффициент затухания излучения в слое фотосшиваемого полимера, измеренный по яркости следа (рис. 1), составил ~ 1 дБ/см.

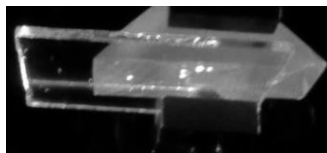


Рис. 1. След лазерного пучка, введенного в полимерный волновод с помощью призмы

Список литературы

1. Могильный В.В. и др. // Взаимод. излучений с твердым телом: Материалы 12 Международной конференции. Минск, 2017. С.261-262.
2. Mahilny U.V., et al. // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2010. V.41. №1. P.1727–1730.
3. Могильный В.В. и др. Фоточувствительный материал для однородной и многодоменной ориентации жидких кристаллов. Патент РБ № 19879 на изобретение.

Н.О. СИМОНОВ, И.Н. ФЛОРЯ, Ю.П. КОРНЕЕВА,
А.А. КОРНЕЕВ, Г.Н. ГОЛЬЦМАН
Московский педагогический государственный университет

ОДНОФОТОННЫЙ ОТКЛИК В ТОНКИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ MoN_x ПЛЕНКАХ

Продемонстрирован однофотонный отклик, при токе близком к критическому, в MoN_x сверхпроводящих полосках шириной 70-104 нм. MoN_x детекторы, имеющие коэффициент диффузии $D \approx 0.32 \text{ см}^2/\text{с}$ и время электрон-фононного взаимодействия $\tau_{e-ph} \approx 300 \text{ пс}$, достигают квантовой эффективности $QE \approx 20\%$ на длине волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$. Возможность реализации однофотонного детектора в данном материале, подтверждает существующую теорию вихревого механизма возникновения фотоотклика в узких сверхпроводящих полосках.

N.O. SIMONOV, I.N. FLORYA, Yu.P. KORNEEVA,
A.A. KORNEEV, G.N. GOLTSMAN
Moscow State University of Education

SINGLE-PHOTON RESPONSE IN THIN SUPERCONDUCTING MoN_x FILMS

Single-photon response is demonstrated near critical current in MoN_x superconducting strips with 70-104 nm thickness. MoN_x detectors with diffusivity $D \approx 0.32 \text{ cm}^2/\text{s}$ and electron-phonon interaction time $\tau_{e-ph} \approx 300 \text{ ps}$ achieve quantum efficiency $QE \approx 20\%$ at 1550 nm wavelength. The opportunity of fabrication of the detector with such material is proved the existed model of vortex assisted mechanism for single-photon response in thin current carrying superconducting strips.

В однофотонных детекторах на основе «грязных» ультратонких сверхпроводниковых пленок наличие однофотонного отклика связано с возникновением горячего пятна после поглощения одиночного фотона и дальнейшим образованием резистивной области в токнесущей полоске шириной 100-150 нм за счет термоактивного вихря или пары вихрь-антивихрь [1]. Динамика формирования резистивного состояния в таких детекторах зависит от коэффициента диффузии и времени электрон-фононного взаимодействия. Малый коэффициент диффузии $D \leq 1 \text{ см}^2/\text{с}$ и время электрон-фононного взаимодействия $\tau_{e-ph} \approx 100 \text{ пс}$ препятствуют быстрому уходу энергии поглощенного фотона в подложку. Поэтому

исследование материалов «грязных» сверхпроводников с такими характеристиками представляется интересным.

MoN_x пленки толщиной 3.2-5 нм были получены методом магнетронного распыления молибденовой мишени на постоянном токе в атмосфере азота. Пленки имели следующие характеристики: поверхностное сопротивление $R_s = 350\text{-}450 \text{ } \Omega/\text{sq}$, $T_c = 5\text{-}7 \text{ K}$, $D = 0.26\text{-}0.38 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau_{\text{e-ph}} \approx 300 \text{ ps}$. Поверхностное сопротивление R_s было измерено четырех зондовым методом Ван-Дер-Пау. Критическая температура T_c определялась как середина перехода на зависимости сопротивления от температуры. Коэффициент диффузии извлекался из зависимости критической температуры в магнитных полях. Время электрон-фононного взаимодействия определялось из частотной зависимости резистивного отклика образца при поглощении амплитудно-модулированного излучения.

На рис. 1 приведена осциллограмма фотоотклика детектора площадью $7 \text{ мкм} \times 7 \text{ мкм}$, зарегистрированная цифровым осциллографом. Далее была исследована зависимость количества отсчетов от мощности падающего излучения в диапазоне длин волн от 405-1550 нм. На рис. 2 представлены результаты этого эксперимента. Из них видно, что число отсчетов с детектора пропорционально числу падающих фотонов или средней мощности лазера, который является Пуассоновским [2].

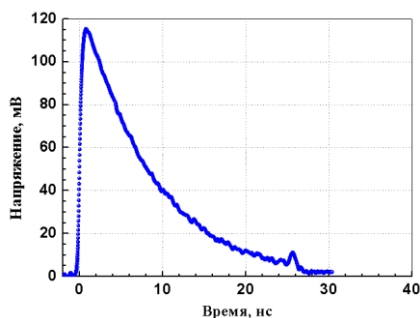


Рис. 1. Осциллограмма однофотонного отклика MoN_x детектора площадью $7 \text{ мкм} \times 7 \text{ мкм}$

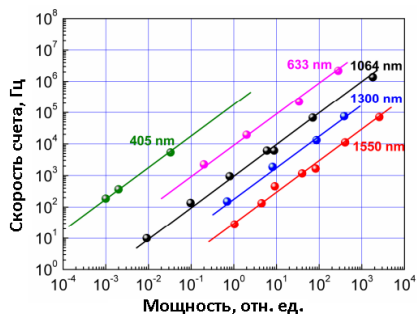


Рис. 2. Зависимость фотоотсчетов от мощности для MoN_x детектора в диапазоне длин волн 405-1550 нм

Список литературы

1. Engel A., Renema J.J., et al. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V.28. P.114003.
2. Korneeva Yu., Florya I., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. V.27. Is.4. P.1.

А.А. ЧИСТОЕДОВА

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ИТО

Приведены исследования оптических свойств пленок ИТО, полученных магнетронным распылением, в видимом и ИК-диапазоне и установлено влияние кислорода в составе пленки на них.

A.A. CHISTOEDOVA

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

OPTICAL PROPERTIES OF ITO FILMS

The article presents research of optical properties of semiconductor films ITO, deposited by reactive magnetron sputtering in visible light spectrum and infra-red spectrum and The influence of oxygen in ITO on optical properties is found.

Светопроницающие проводящие покрытия на основе оксидов индия и олова (ИТО) активно используются для создания элементов солнечных батарей, прозрачных электродов, жидкокристаллических и сенсорных экранов, светодиодов [1]. Вследствие широкой области применения покрытий на основе оксида индия-олова вопрос формирования этих покрытий с высокими выходными характеристиками является актуальным.

Целью данной работы является исследование свойств пленок ИТО в широком диапазоне длин волн.

В качестве образцов исследований выбраны пленки ИТО, полученные методом магнетронного распыления, толщиной 200 нм с напыленными металлическими контактами. Пленки напылялись в среде аргона и кислорода с разным процентным содержанием кислорода (5 и 15 %) на ситалловые и кремниевые подложки. Далее производился отжиг в атмосфере азота при температуре 600 °С в течение 25 минут.

Ранее было установлено, что содержание кислорода в среде напыления напрямую влияет на его количество в составе пленки [1]. Также кислород влияет и на сопротивление ИТО. При комнатной температуре для ИТО с 15 % O₂ - 52 Ом, для ИТО с 5 % O₂ - 38 Ом.

С помощью USB-спектрометра были получены зависимости коэффициента пропускания от длины волны в видимом диапазоне длин волн. Для образца с большим содержанием кислорода коэффициент

пропускания достигает 90 %. Методом Фурье-спектроскопии были получены зависимости коэффициента пропускания в ИК-диапазоне от частоты. Коэффициент пропускания от ближней к дальней ИК-области уменьшается на 70 % для обоих образцов. Также была получена зависимость коэффициента отражения от частоты. Коэффициент отражения также уменьшается от ближней к дальней области ИК-спектра для ИТО с 15 % O_2 - на 20 %, для ИТО с 5 % O_2 - на 10 %.

Методом магнетронного распыления получены пленки ИТО с поверхностным сопротивлением 80 Ом/м^2 с коэффициентом пропускания 90 % в видимой области спектра и до 80 % в ближней ИК-области спектра. Пленки ИТО обладают низким коэффициентом отражения (25 %) и малым пропусканием в ближней и средней ИК-области спектра. Пленки с большим содержанием кислорода обладают большей прозрачностью и большим коэффициентом пропускания.

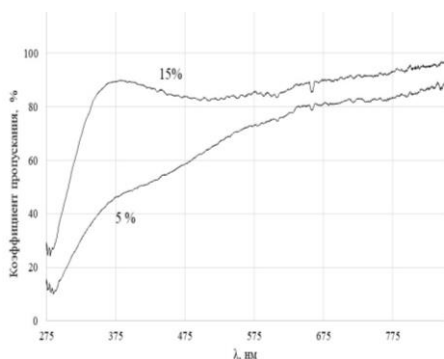


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны в видимом диапазоне

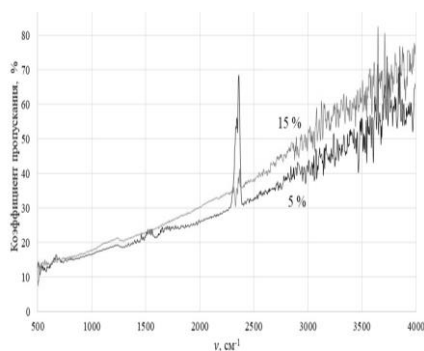


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания от частоты в ИК-области

Список литературы

1. Троян П.Е., Сахаров Ю.В., Жидик Ю.С. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. N2-1 (31). С.99-101.
2. Чистоедова А.А., Жидик Ю.С. Исследование рельефа и химического состава ИТО до и после отжига // Научная сессия ТУСУР-2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа: в 8 частях. Томск: В-Спектр, 2017. Ч.2. С.155-157.

В.В. СМІРНОВ, О.М. АЛЫКОВА, Е.И. БЕЗНИСКО

Астраханский государственный университет

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С УЧЕТОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

В работе приведено решение задачи по расчету параметров монокристаллических пленок заданного состава с учетом введенных эмпирических коэффициентов, полученных с помощью модельных расчетов. Критерием достоверности решения является сравнение результатов решения с экспериментальными значениями параметров.

V.V. SMIRNOV, O.M. ALYKOVA, E.I. BEZNISKO

Astrakhan State University

THE CALCULATION OF THE BASIC PARAMETERS OF FERRITE-GARNETS FILMS WITH CONSIDERATION OF EMPIRICAL RATIOS

In work the task of calculation of parameters of single crystal films of a given composition with the introduction of empirical coefficients obtained from model calculations. The reliability criterion of the solution is the comparison of the results of the solutions with the experimental values.

Магнитные материалы находят широкое применение в современной микроэлектронике. Знание их параметров позволяет осуществлять прогноз устойчивости работы устройства при различных условиях (в первую очередь температурных) окружающей среды [1-3]. На основе анализа большого числа экспериментальных данных [4] и модельных расчетов в используемые формулы были введены эмпирические коэффициенты для приведения в соответствие теоретических расчетов и экспериментальных значений параметров МПФГ [5].

Полученная формула намагниченности насыщения M_s с учётом температурной зависимости количества и типа редкоземельных элементов имеет вид:

$$M_s = \frac{\nu}{\nu_{\text{ст}}} \left(n_a M_a \times 1,18 \left(1 - \frac{T}{T_N} \right)^{0,323} - n_d M_d \times 1,2 \left(1 - \frac{T}{T_N} \right)^{0,349} + n_c M_c \times 1,1 \left(1 - \frac{T}{T_N} \right)^{-4,93} \right). \quad (1)$$

Значение намагниченности M_s для состава $\text{Sm}_{0,65}\text{Lu}_{0,27}\text{Tm}_{1,2}\text{Y}_{0,82}\text{Gd}_{0,24}\text{Al}_{0,2}\text{Fe}_{4,8}\text{O}_{12}$ с $T_N = 529\text{K}$ при $T = 300\text{K}$ составило $112,76$ кА/м. Экспериментальное значение намагниченности данной плёнки $M_s = 102,8$ кА/м [4, с. 81]. По формуле (1) была рассчитана намагниченность насыщения M_s для 20 МПФГ различного состава.

На основании положений теории полосовых доменов и теории стабильности ЦМД [1, 3, 6] были рассчитаны напряженность поля коллапса ЦМД H_0 , напряженность поля эллиптической неустойчивости ЦМД H_2 , константа обменного взаимодействия A , константа одноосной анизотропии K_u и другие.

В табл. 1 приведено сравнение рассчитанных параметров МПФГ состава $\text{Sm}_{0,41}\text{Lu}_{2,07}\text{La}_{0,52}\text{Ga}_{0,58}\text{Fe}_{4,42}\text{O}_{12}$ с экспериментальными данными. Экспериментальные данные были взяты из справочника [4, с. 81].

Таблица 1

Состав	Намагниченность насыщения M_s , кА/м		Поле коллапса H_0 , кА/м		Фактор качества Q		Константа одноосной анизотропии K_u , кДж/м ³		Константа обменного взаимодействия A , пДж/м	
	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент
$\text{Sm}_{0,41}\text{Lu}_{2,07}\text{La}_{0,52}\text{Ga}_{0,58}\text{Fe}_{4,42}\text{O}_{12}$	74,5	76,4	35,16	36,2	1,67	1,8	6,6	6,68	2,46	2

Список литературы

1. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. М.: Мир, 1987.
2. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов. М.: Мир, 1983.
3. Круличка С. Физика ферритов. М.: Мир, 1976. Ч.1.
4. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987.
5. Смирнов В.В., Алыкова О.М., Безниско Е.И., Курамшин К.В. Оптимизация состава и параметров монокристаллических пленок феррит-гранатов под задачи прикладной оптоэлектроники // VI Международная конференция «Фотоника и информационная оптика»: Сборник научных трудов. М: НИЯУ МИФИ, 2017. С.504-505.
6. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982.

Я.М. АНДРЕЕВА, Э.И. АГЕЕВ, М.М. СЕРГЕЕВ, В.П. ВЕЙКО
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ В ПОРИСТЫХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТНЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЕЙ

В работе показана возможность использования лазерного излучения в качестве инструмента управления оптическими свойствами нанокompозитного материала на основе силикатного золь-геля, импрегнированного наночастицами меди, за счёт изменения размера и концентрации таких частиц в материале.

Ya.M. ANDREEVA, E.I. AGEEV, M.M. SERGEEV, V.P. VEIKO
ITMO University, Saint-Petersburg

LASER SYNTHESIS OF COPPER NANOPARTICLES IN POROUS FILMS ON THE BASE OF SILICA GEL

In this work, we show the possibility of laser-induced adjustment of optical properties of the nanocomposite based on silica gel film impregnated with copper nanoparticles. The effect is achieved by changing of nanoparticles sizes and concentrations in a laser affected zone.

Возможность создания материалов и структур, обладающих новыми оптическими свойствами, является необходимым условием для развития устройств фотоники и принципов их работы. В частности, большой интерес представляют металл-диэлектрические композиты, получаемые с использованием золь-гель технологий [1]. Для управления оптическими свойствами подобных материалов эффективно применяется лазерная обработка [2]. Под действием лазерного излучения возможно не только локальное изменение размера и формы создаваемых наночастиц, но также и управление их пространственным распределением в силикатной матрице. Ранее, были показаны возможности синтеза наночастиц серебра в золь-гель плёнках диоксида титана и их упорядоченной организации под действием лазерного излучения видимого диапазона [3]. В настоящей работе представлены результаты исследований по формированию наночастиц меди в пленках на основе силикатного золь-геля под действием непрерывного излучения CO₂ лазера.

Цель работы – изучение возможности лазерного синтеза наночастиц меди в силикатных пористых пленках.

В работе использовались нанопористые плёнки на основе силикатного золь-геля толщиной 0,7-2,0 мкм, нанесённые на поверхность кварцевого стекла. Плёнки пропитывались 80 % раствором нитрата меди II ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) в ультразвуковой ванне в течение часа. За счёт высокой пористости плёнки соль равномерно проникала в структуру материала, после чего полученный композит подвергался лазерной обработке. В качестве энергетического источника использовался непрерывный CO_2 лазер с длиной волны 10,6 мкм, оснащенный двух координатной сканирующей системой. Лазерный пучок диаметром 200 мкм на поверхности пленки перемещался с различными скоростями в диапазоне $v = 1-50$ мм/с.

В результате лазерной обработки происходило локальное нагревание пленки, которое сопровождалось разложением нитрата меди II с последующим восстановлением ионов меди при температуре более 120 °С. Далее происходило формирование наночастиц меди, размер и форма которых определялись плотностью мощности в пределах лазерного пятна ($q = 3,8-5,3$ кВт/см²). Были измерены спектры поглощения образцов, полученных при различных значениях плотности мощности и скорости обработки. По смещению пиков плазмонного резонанса можно судить о влиянии условий лазерной обработки на размер, структуру и концентрацию наночастиц меди. Анализ образцов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показал, что относительное содержание меди в зоне лазерного воздействия изменяется в зависимости от значения плотности мощности с 20 до 40 % (в). При этом содержание меди в исходной пленке составляло 9 %. Изображения поверхности образцов, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа, демонстрируют максимальную концентрацию наночастиц и кластеров меди по краям лазерного трека.

Таким образом, золь-гель плёнки представляют интерес в качестве диэлектрических матриц для устройств фотоники, а лазерное излучение является перспективным инструментом управления оптическими свойствами полученного материала.

Список литературы

1. Islam S., et al. Mesoporous nanocomposite coatings for photonic devices: sol-gel approach // Applied Physics A. 2016. V.122. №10. P.935.
2. Liu Z., et al. Understanding the growth mechanisms of Ag nanoparticles controlled by plasmon-induced charge transfers in Ag-TiO₂ films // The Journal of Phys. Chemistry C. 2015. V.119. №17. P.9496-9505.
3. Destouches N., et al. Self-organized growth of metallic nanoparticles in a thin film under homogeneous and continuous-wave light excitation // Journal of Materials Chemistry C. 2014. V.2. №31. P.6256-6263.

П.А. ДАНИЛОВ², А.А. ИОНИН², С.И. КУДРЯШОВ^{1,2},
И.Н. САРАЕВА², С.Ф. УМАНСКАЯ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ФЕМТОСЕКУНДНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТОНКУЮ ПЛЕНКУ ОКСИДА МЕДИ (I)

Приведены результаты фемтосекундного лазерного воздействия на тонкую полупрозрачную пленку оксида меди (I) на стеклянной подложке в абляционном и преабляционном режимах. Определены пороги абляции. Воздействие жесткофокусированного лазерного излучения видимого диапазона на пленку оксида меди (I) в доабляционном режиме приводит к переплаву, вспениванию или отжигу оксидной пленки. А так же в областях расплава пленка оксида меди (I) доокисляется до оксида меди (II).

P.A. DANILOV², A.A. IONIN², S.I. KUDRYASHOV^{1,2},
I.N. SARAIEVA², S.F. UMANSKAYA^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FEMTOSECOND LASER IMPACT ON A THIN FILM OF COPPER (I) OXIDE

The result of femtosecond laser impact on a thin translucent film of copper (I) oxide on a glass substrate in pre-ablation and ablation mode is presented. The ablation thresholds are determined. The impact of hard-focus femtosecond laser radiation of the visible range on thin film of copper (I) oxide in the pre-ablation mode leads to remelting, foaming or annealing of the oxide film. And the copper oxide (I) film is oxidized to copper (II) oxide in the melt region of film.

Фемтосекундные лазеры предоставляют уникальные возможности для прецизионной нано- и микро-обработки тонких пленок. Однако, процессы воздействия ультракороткого лазерного излучения на различные тонкопленочные оксидные материалы изучены еще в недостаточной мере.

Кроме того, в последнее время активно исследуются метаповерхности – это искусственно созданные композиты, которые имеют свойства, нехарактерные для природных материалов. Метаповерхности обычно создаются нанолитографическими методами, которые очень непрактичны из-за своей дороговизны и сложности фабрикации. Один из новых

исследуемых методов создания метаповерхностей – создание при помощи лазера периодических структур с периодом, сравнимым с длиной волны.

Целью работы является исследование воздействия жесткофокусированного фемтосекундного лазерного излучения видимого диапазона при различных энергиях на тонкую пленку оксида меди (I) в том числе для определения механизма фотоиндуцированного восстановления оксида и вероятности формирования объемного коллоида медных наночастиц. Данное воздействие исследовалось в перспективе его дальнейшего применения для создания метаповерхностей.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Использовался фемтосекундный волоконный лазер, легированный ионами Yb^{+3} . Длина волны второй гармоники – 515 нм, используемый диапазон энергий: $E = 8 \text{ нДж} - 1.32 \text{ мкДж}$.

На рис. 2 показаны СЭМ-снимки области оплавления/отжига с перекристаллизацией, переплава и вспенивания нанозернистой структуры пленки, что является результатом воздействия фемтосекундного лазерного излучения на токую пленку оксида меди (I) в доабляционном режиме. Методом энергодисперсионного рентгено-спектрального химического микроанализа (ЭДРС) было определено, что в областях расплава пленки оксида меди (I) происходит доокисление до оксида меди (II).

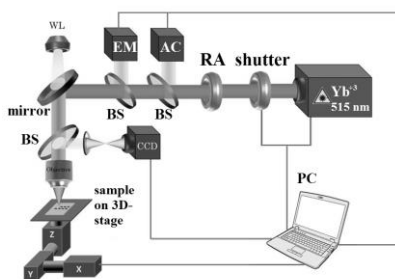


Рис. 1. Экспериментальная установка:

RA – отражательный ослабитель, shutter – затвор, AC – автокоррелятор,

EM – измеритель энергии,

WL – галогеновая лампа подсветки,

BS – делитель пучка, CCD – ПЗС-камера, PC – компьютер

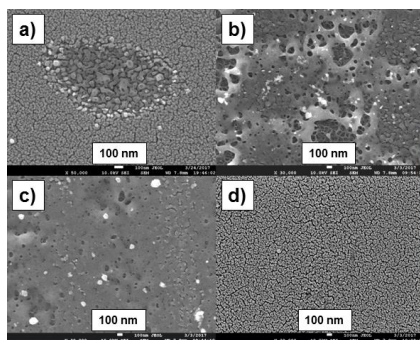


Рис. 2. СЭМ-снимки области оплавления/отжига с перекристаллизацией (а), переплава (b) и вспенивания (с) нанозернистой структуры пленки (d)

В.В. ГОРБЯК, А.И. СИДОРОВ, О.А. ПОДСВИРОВ¹, У.В. ЮРИНА¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛАХ

Экспериментально показано, что при облучении электронами серебросодержащих стекол может быть реализована запись оптической информации. Считывание может производиться как по изменению интенсивности люминесценции, так и по изменению поглощения в облученных участках.

V.V. GORBYAK, A.I. SIDOROV,
O.A. PODSVIROV¹, U.V. YURINA¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

ELECTRON BEAM OPTICAL INFORMATION RECORDING IN SILVER-CONTAINING GLASSES

It was shown experimentally that by the electron beam irradiation of silver-containing glasses optical information can be recorded. Reading can be done on change in the luminescence intensity either on absorbance change in the irradiated areas.

Неорганические стекла, содержащие серебро, являются перспективным материалом для записи оптической информации. Как было показано в работе [1], при облучении УФ лазерными импульсами в серебросодержащих стеклах могут быть сформированы люминесцентные молекулярные кластеры (МК) и наночастицы (НЧ) серебра, обладающие плазмонным резонансом. Целью данной работы являлась демонстрация возможности получения аналогичного эффекта при электронном облучении.

В экспериментах использовались силикатные и фосфатные стекла. В первом случае концентрация серебра составляла 0.12 мол.%, а во втором случае 17 и 30 мол.%. Облучение проводилось на сканирующем электронном микроскопе с энергией электронов 50 кэВ и дозами от 5 до 100 мКл/см² диаметром 2 мм. Следует отметить, что электронный луч может быть сфокусирован в пятно до 10 нм. Облучение проводилось при комнатной температуре. Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

После облучения в облученных участках возникает люминесценция в видимой области спектра, связанная с переходом МК серебра в стекле из заряженного состояния в нейтральное [2]. Однако в центре некоторых облученных областей наблюдается тушение люминесценции, что может быть обусловлено высокой концентрацией нейтральных МК. Повышение концентрации МК связано с полевой миграцией ионов серебра из объема стекла в облученную зону. Кроме того, возникает люминесценция во всем объеме стекла. Это связано с тем, что при воздействии электронного луча на стекло возникает рентгеновское излучение, которое ионизирует компоненты стекла. При этом возникают свободные электроны, которые переводят заряженные МК в нейтральное состояние. Термообработка приводит к появлению плазмонной полосы поглощения в облученных участках, что указывает на образование НЧ серебра.

Таким образом, электронным лучом может быть записана оптическая информация в серебросодержащих стеклах, как созданием люминесцентных центров, так и центров окраски.

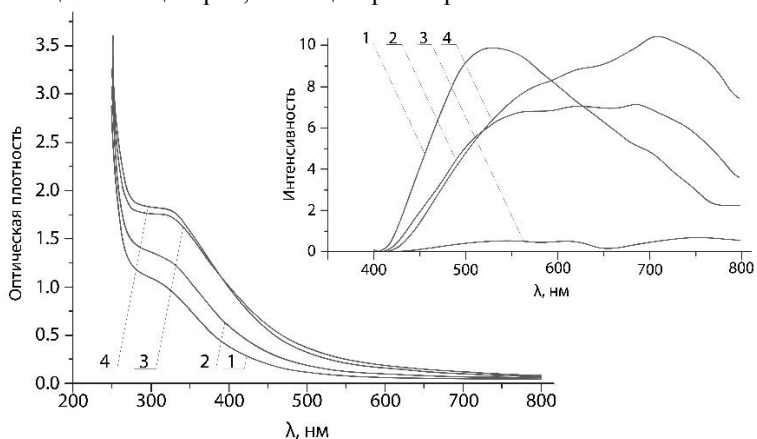


Рис. 1. Спектры оптической плотности облученных участков, на вставке спектры люминесценции, дозы облучения: 1-5, 2-10, 3-30, 4-20 мКл/см²

Список литературы

1. Gorbak V. V., Sidorov A. I., Vasilyev V.N., Dubrovin V.D., Nikonov N.V. Multilevel optical information recording in silver-containing photosensitive glasses by UV laser pulses // Opt. Eng. 2017. V.56(4). P.047104.
2. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. // Optical Materials. 2014. V.36. P.753-759.

М.А. ГОРЯЕВ

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

УСЛОВИЯ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ ФОТОЭФФЕКТА В СИСТЕМЕ «КРАСИТЕЛЬ – ПОЛУПРОВОДНИК»

Для эффективной спектральной сенсibilизации фотоэффекта необходимы электронные состояния в полупроводнике, способные акцептировать энергию от красителя, и приповерхностный изгиб зон в полупроводнике.

М.А. GORYAEV

Herzen Russian State Pedagogical University, Saint-Petersburg

CONDITIONS OF PHOTOEFFECT SENSITIZATION IN DYE – SEMICONDUCTOR SYSTEM

The necessary requirements for the photoeffect sensitization are the existence of electron states in the semiconductors capable of accepting energy from the dye and subsurface band curve.

В широкозонных полупроводниках с красителями на их поверхности наблюдается сенсibilизация внутреннего фотоэффекта и это применяется в классической фотографии на основе AgHal [1-4] и в солнечных ячейках на TiO₂ [5]. Также красители сенсibilизируют фотопроводимость порошкообразного кремния [6-8] и конденсаторную фото-эдс монокристаллов кремния [8, 9]. В работе рассмотрены процессы формирования фотоэлектрической чувствительности в полупроводниках с красителями на поверхности и возможности управления ими.

Необходимое условие для сенсibilизации широкозонных полупроводников – наличие в запрещенной зоне локальных электронных состояний, способных акцептировать энергию от красителя. Их интегральная плотность должна составлять $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [2-4]. В случае кремния поглощение в области сенсibilизации формируется собственными переходами и энергия красителя эффективно акцептируется полупроводником. Фотопроводимость порошкообразных образцов в области поглощения красителей более, чем на порядок выше фотопроводимости неокрашенного кремния [6-8]. Увеличение эффективности генерации носителей в приповерхностной области определяется тем, что поглощение в собственной области

полупроводника формируется непрямыми электронными переходами с относительно небольшими коэффициентами экстинкции.

Эффективность сенсibilизации конденсаторной фото-эдс в монокристаллах кремния существенно меньше, чем в порошкообразных образцах [8, 9]. Это связано не только с тем, что удельная поверхность мелкодисперсных порошков на несколько порядков больше, чем у монокристалла. Фото-эдс имеет дрейфовую и диффузионную компоненты [10]. Если спектр дрейфовой составляющей повторяет спектр фотопроводимости, то диффузионная фото-эдс определяется не концентрацией носителей, а их градиентом. В зависимости от приповерхностного изгиба зон дрейфовый и диффузионный токи или складываются, или имеют противоположные знаки. На гетеропереходе краситель – кремний обнаружен эффект смены знака фотопотенциала при освещении в разных областях спектра [11].

Приповерхностный изгиб в полупроводниках можно регулировать внешним электрическим полем или дополнительной подсветкой [10]. Направленной адсорбцией электронодонорных и электроноакцепторных молекул на поверхности полупроводников также удается управлять эффективностью спектральной сенсibilизации фотоэффекта [2]. Масштабы возмущения и глубина проникновения воздействия при этом достигает величин порядка микрона, что проявляется в изменении оптического поглощения ряда монокристаллов [12]. В формировании изгиба зон принимают участие мелкие локальные центров. В хорошо сенсibilизируемых полупроводниках концентрация уровней прилипания больше 10^{12-2} см⁻² и введение ионов хлора в сульфиды цинка и кадмия позволяет превратить их из несенсibilизируемых в хорошо сенсibilизируемые фотопроводники [2].

Список литературы

1. Джеймс Т.Х. Теория фотогр. процесса. Л.: Химия, 1980.
2. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсibilизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.
3. Акимов И.А., Горяев М.А. // Журн. физ. химии. 1984. Т.58. №5. С.1104.
4. Горяев М. Физ.осн фотохимии тв.тела. Saarbrucken: Lambert Acad.Publ. 2013.
5. Gratzel M. // J. Photochem. Photobiol.C: Photochem.Rev. 2003. V.4. №2. P.145.
6. Горяев М.А. // Журн. физ. химии. 2015. Т.89. №12. С.1940.
7. Горяев М.А. // V межд. конф. по фотонике и информ. оптике: Сб.научн.тр. 2016. С.295.
8. Goryaev M.A. // Intern.J.Modern Eng. Research. 2017. V.7. №5. P.39.
9. Горяев М.А. // VI межд. конф. по фотонике и информ. оптике: Сб.научн.тр. 2017. С.68.
10. Акимов И.А. // Опт.-мех. пром. 1966. №5. С.4.
11. Комолов С.А., Герасимова Н.Б. и др. // Журн. техн. физ. 2006. Т.76. №7. С.76.
12. Пименов Ю.Д., Горяев М.А. // Кинетика и катализ. 1976. Т.17. №4. С.1035.

Н.А. ВОЛКОВА¹, О.В. ИСТОМИНА², С.К. ЕВСТРОПЬЕВ¹,
Е.В. КОЛОБКОВА^{1,2}, Н.В. НИКОНОРОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

ОСОБЕННОСТИ ФОТОЛИЗА ДИАЗОКРАСИТЕЛЯ CHICAGO SKY BLUE В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ НИТРАТОВ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ

Приведены результаты экспериментов по фотолизу диазокрасителя *Chicago Sky Blue* в водных растворах нитратов цинка, серебра и иттрия и композиционных органо-неорганических покрытиях. Экспериментально показано, что присутствие нитратов металлов существенно влияет на характер изменения спектральных свойств растворов и композиционных покрытий под действием УФ-излучения и значительно ускоряет процесс фотолиза.

N.A. VOLKOVA¹, O.V. ISTOMINA², S.K. EVSTROPIEV¹,
E.V. KOLOBKOVA^{1,2}, N.V. NIKONOROV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University)

FEATURES OF THE PHOTOLYSIS OF DIAZO DYE CHICAGO SKY BLUE IN AQUEOUS SOLUTIONS OF METAL NITRATES AND COMPOSITE ORGANIC-INORGANIC COATINGS

This work presents the result of experiments on the photolysis of diazo dye *Chicago Sky Blue* in aqueous solutions of metal nitrates and composite organic-inorganic coatings. The presence of metal nitrates significantly changes the behavior of spectral properties evolution under UV irradiation and accelerates photolysis process.

Процессы фоторазложения красителей хорошо известны и широко используются как для очистки воды, так и для оценки фотокаталитической активности материалов [1-3].

Целью работы является экспериментальное исследование особенностей фотолиза диазокрасителя *Chicago Sky Blue* (CSB) в водных растворах нитратов цинка и иттрия и композиционных органо-неорганических покрытиях. Спектральные свойства CSB известны [4] и этот краситель используется при исследованиях фотокатализа [1, 3].

В качестве объектов исследования были использованы водные растворы, содержащие нитраты цинка, серебра и иттрия. Для получения композиционных покрытий эти растворы смешивались в заданном соотношении с раствором высокомолекулярного ($M_w = 1300000$) поливинилпирролидона в пропанол-2. Композиционные покрытия были сформированы на поверхности стекол окунанием их в пленкообразующий раствор с последующим извлечением и сушкой. Измерения спектров поглощения выполнялось на спектрофотометре Perkin-Elmer Lambda 650.

Рис. 1 иллюстрирует характер изменения спектров поглощения водного раствора CSB ($4,3 \cdot 10^{-5}$ М) под действием УФ-излучения.

На рис. 2 представлены спектры поглощения водных растворов нитратов цинка (0,14 М) и иттрия (0,012 М), содержащих CSB и подвергнутых УФ-облучению ртутной лампой высокого давления.

Сопоставление спектров поглощения растворов, приведенные на рис. 1 и 2, показывает, что процесс разложения CSB в присутствии нитратов металлов протекает значительно быстрее и сопровождается сдвигом интенсивной полосы поглощения красителя в видимой части спектра в коротковолновую область.

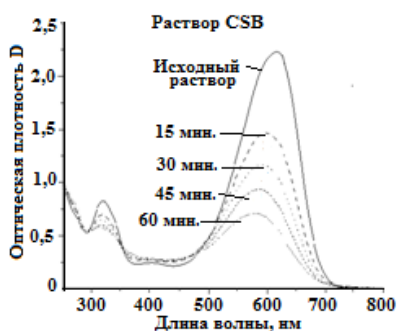


Рис. 1. Изменения спектров поглощения раствора CSB ($4,3 \cdot 10^{-5}$ М) под действием УФ-излучения

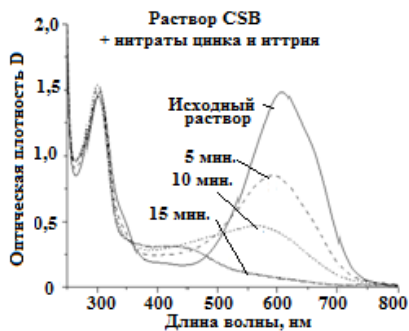


Рис. 2. Изменения спектры поглощения растворов Zn(NO₃)₂ и Y(NO₃)₃, содержащих CSB ($4,3 \cdot 10^{-5}$ М) под действием УФ-излучения

Список литературы

1. El-Bahy Z.M., Ismail A.A., et al. // J. Hazardous Mater. 2009. V.166(1). P.138.
2. Kiselev V.M., Evstropiev S.K., et. al. // Optics and Spectroscopy. 2017. V.123(5) P.809.
3. Zainal Z., Hui L.K., et al. // J. Hazardous Mater. 2005. V. B125. P.113.
4. Abbott L.C., Batchelor S.N., et al. // J. Phys. Chem. B. 2004. V.108, P.13786.

А.В. ЕГОРЫШЕВА¹, Т.Д. ДУДКИНА,
О.М. ГАЙТКО¹, О.Г. ЭЛЛЕРТ¹

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва*

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЖНОГО ОКСИДА $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ СО СТРУКТУРОЙ ПИРОХЛОРА

Изучены оптические и фотокаталитические свойства сложного оксида $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ со структурой пирохлора. Фотокаталитическая активность $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ в реакции разложения фиолетового кристаллического под действием излучения видимого диапазона оказалась выше по сравнению с коммерчески используемым TiO_2 .

A.V. EGORYSHEVA¹, T.D. DUDKINA, O.M. GAITKO¹,
O.G. ELLERT¹

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
¹Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow*

PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF COMPLEX OXIDE $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ WITH PYROCHLORE STRUCTURE

The optical and photocatalytic properties of $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ complex oxide with pyrochlore structure were studied. The photocatalytic activity of $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ in the model crystal violet degradation reaction under visible-light irradiation is higher in comparison with the commercial TiO_2 .

Висмутсодержащие пирохлоры Bi_2MTaO_7 ($M = \text{In, Ga, Fe, Y, La}$), Bi_2MNbO_7 ($M = \text{Al, Ga, In, Y}$), $\text{Bi}_2\text{MnNbO}_7$ ($M = \text{Al, Ga, In, Fe}$) и Bi_2MTaO_7 ($M = \text{Y, La}$) в определенных условиях проявляют фотокаталитические свойства под действием излучения видимого диапазона. Относительно фотокаталитической активности хромсодержащих пирохлоров в настоящий момент ничего не известно. Поэтому мы синтезировали пирохлор состава $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ и охарактеризовали его с помощью методов РФА, спектроскопии диффузного отражения и фотокаталитических тестов. Спектр диффузного отражения $\text{Bi}_{1,8}\text{Cr}_{1,2}\text{SbO}_7$ представлен на рис. 1. Обычно край фундаментального поглощения оксидов висмута сформирован переходами между расщепленными 2р-О, 6s- и 6р-Ві электронными состояниями Ві-О полиэдров. В зависимости от структуры соединения величина запрещенной зоны E_g лежит в диапазоне

2.5-4.0 эВ. Однако, в случае $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$, полоса перехода с переносом заряда Bi-O полиэдров перекрывается с полосой ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_1$ перехода октаэдрически координированных ионов Cr^{3+} . Поэтому край поглощения $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ пироклора смещен относительно ранее изученного $\text{Bi}_{1.8}\text{Ga}_{1.2}\text{SbO}_7$ ($E_g = 2.9$ эВ) и лежит в области 2.45 эВ. Широкая полоса поглощения в области 580-750 нм обусловлена еще двумя переходами иона Cr^{3+} ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^4\text{T}_2$ и ${}^4\text{A}_2 \rightarrow {}^2\text{E}$. Таким образом, величина запрещенной зоны $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ меньше, чем у коммерческого фотокатализатора TiO_2 (Degussa P25), что делает перспективным дальнейшее изучение фотокаталитических свойств этого соединения.

Фотокаталитическую активность $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ изучали на примере реакции разложения фиолетового кристаллического под действием излучения видимого диапазона. Фотокаталитические тесты показали, что, как и другие висмутсодержащие пироклолы, $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ практически не разлагает краситель. Поэтому в раствор красителя в качестве акцептора вводили добавки H_2O_2 . Добавки H_2O_2 выбирались таким образом, что его количества было недостаточно для фоторазложения красителя в отсутствие пироклора. Для сравнения также были исследованы синтезированные ранее $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2}\text{SbO}_7$ и $\text{Bi}_{1.84}\text{Ni}_{0.79}\text{Sb}_{1.37}\text{O}_7$ пироклолы. Незначительные различия площади поверхности изученных образцов (7-10 cm^2/g) не могло повлиять на результаты фотокаталитических тестов. Как видно на рис. 2, в присутствии H_2O_2 пироклор $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ разлагает краситель на 70 % в течение 9 ч. Интенсивность поглощения кристаллического фиолетового в максимуме полосы $\lambda_{\text{max}} = 591$ нм уменьшалась с увеличением времени облучения. При этом новых полос поглощения не возникало, что указывает на полное фоторазложение красителя. $\text{Bi}_{1.8}\text{Cr}_{1.2}\text{SbO}_7$ и $\text{Bi}_{1.84}\text{Ni}_{0.79}\text{Sb}_{1.37}\text{O}_7$ пироклолы демонстрируют более высокую фотокаталитическую активность по сравнению с коммерчески используемым TiO_2 (Degussa P25) и $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2}\text{SbO}_7$ в присутствии H_2O_2 . Фотокаталитическая активность Cr- и Ni-содержащих пироклолов практически совпадали.

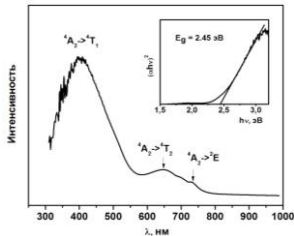


Рис. 1. Спектр диффузного отражения

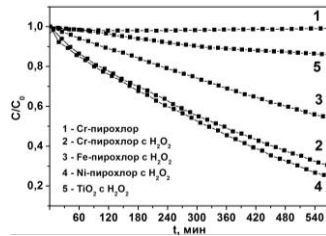


Рис. 2. Фотокаталитическая активность

Д.А. ЮРЧЕНКО, И.С. ПИЧУГИН, А.И. ИГНАТЬЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ СУРЬМЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЕКЛАХ

Исследовано влияние концентрации сурьмы на кинетику образования наноразмерных серебряных коллоидных центров в фототерморефрактивных стеклах. Получены зависимости коэффициента поглощения максимума плазмонного резонанса серебряных частиц от концентрации сурьмы.

D.A. YURCHENKO, I.S. PICHUGIN, A.I. IGNATIEV
ITMO University, Saint-Petersburg

THE EFFECT OF ANTIMONY IN THE FORMATION OF SILVER NANOPARTICLES IN PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES

The effect of antimony concentration in photo-thermo-refractive glasses composition on silver nanoparticles formation was investigated. The dependences of the absorption coefficient of plasmon resonance peak of silver particles on the concentration of antimony.

Фототерморефрактивные (ФТР) стекла – перспективный материал фотоники, в котором под действием УФ облучения и последующей термообработки образуются наноразмерные и субнаноразмерные серебряные частицы, на которых впоследствии происходит рост разнообразных кристаллических фаз [1]. ФТР стекла используются в качестве основного оптического материала для многих применений фотоники с характеристиками, сопоставимыми с другими имеющимися на рынке материалами [2]. На его основе создаются элементы для фазовой синхронизации в многомодовых лазерах, селекторы продольных и поперечных мод, notch фильтры для рамановской спектроскопии, угловые и спектральные селективные элементы для задач спектрального и когерентного сложения в высокоэнергетических лазерах [3]. Выделенные в ходе УФ облучения и термообработки в ФТР стекле серебряные металлические наночастицы также представляют научный интерес и применяются в плазмонных сенсорах, волноводах, устройствах наноплазмоники, интегральной оптики и люминесцентных биосенсорах [4].

Для проведения исследований были синтезированы стекла системы $\text{Na}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{F} - \text{Cl}$, содержащие CeO_2 , Ag_2O и переменное количество Sb_2O_3 от 0 до 0,065 мол.%. Синтез стёкол проводился в кварцевых тиглях при температуре 1460°C в воздушной атмосфере. Температура стеклования (T_g) была измерена методом ДСК на приборе NETZSCH STA 449F. Отжиг проводился при температурах от 490 °C. Образцы изготавливались в виде полированных плоскопараллельных пластин толщиной $\approx 0,4$ мм, подвергались облучению УФ ртутной лампы с различной дозой и термической обработке в муфельной печи при температуре 560 °C. На каждой стадии эксперимента на спектрофотометре Lambda 650 с шагом 1нм был измерен спектр поглощения: исходного стекла, после УФ-облучения и после термической обработки. Из спектра излучения ртутной лампы светофильтрами выделялась область 290-410 нм, чтобы обеспечить попадание излучения в полосу поглощения иона Ce^{3+} . Такой интервал был выбран для исключения оптического обесцвечивания фотоиндуцированных полос. Облучение образца происходило через диафрагму с диаметром 5 мм.

В работе показано:

- введение оксида сурьмы в ФТР стекло не влияет на спектр поглощения исходных образцов.

- в отсутствии оксида сурьмы коллоидное серебро в ФТР стекле не образуется.

- зависимость коэффициента поглощения коллоидного серебра от концентрации оксида сурьмы в стекле.

- динамика движения максимума полосы плазмонного резонанса серебра от концентрации оксида сурьмы в стекле.

- спектры добавочного поглощения ФТР стёкол с различным содержанием оксида сурьмы после УФ-облучения с различными дозами.

Список литературы

1. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. // Оптический журнал. 2014. Т.81. №6. С.72-77.
2. Игнатьев А.И., Нашекин А.В., Неведомский В.М., Подсвилов О.А., Сидоров А.И., Соловьев А.П., Усов О.А. // Журнал технической физики. 2011. Т.81. №5. С.75-80.
3. Lumeau J., Zanotto E.D. // International Materials Reviews. 2017. V.62. P.348-366.
4. Nikonov N., Aseev V., Dubrov V., Ignatiev A., Ivanov S., Sgibnev Ye., Sidorov A. // Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. 2016. P.20-27.

И.С. ПИЧУГИН, А.И. ИГНАТЬЕВ, С.А. ИВАНОВ, Д.А. КОЗЛОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫЕ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫЕ СТЕКЛА

Представлены результаты исследования влияния германия на спектральные и оптические свойства фототерморелрактивных стекол и стеклокерамик на их основе.

I.S. PICHUGIN, A.I. IGNATIEV, S.A. IVANOV, D.A. KOZLOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

GERMANOSILICATE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES

The results of influence of germanium on the spectral and optical properties of photo-thermo-refractive glasses and glass-ceramics based on them are presented.

Фототерморелрактивные (ФТР) стекла – это новый класс фоточувствительных неорганических материалов, которые созданы для записи высокоэффективных термостабильных объемных брэгговских решеток. В этих стеклах под воздействием УФ облучения и последующей термообработки в облученной области объема стекла вырастает наноразмерная кристаллическая фаза, показатель которой отличается от показателя преломления необлученной области стекла [1]. Этот эффект используется для создания голографических оптических элементов. Голограммы на ФТР стекле обладают высокой дифракционной эффективностью, долгим сроком хранения, высокой химической, механической и термической прочностью.

Двуокись германия является аналогом двуокиси кремния. Его введение в стекло увеличивает показатель преломления и не повышает кристаллизационную способность [2]. В чистом виде оксид германия в оптике не используется, однако часто встречается в сочетании с крменеземом.

Одной из важнейших характеристик ФТР стекла как голографического материала является изменение показателя преломления (Δn) между облученной и необлученной областями. Согласно приближению Максвелла-Гарнетта эффективная диэлектрическая проницаемость среды с включениями описывается следующим выражением (1) [3, 4]:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \frac{2\delta_i(\varepsilon_i - \varepsilon_m) + \varepsilon_i + 2\varepsilon_m}{2\varepsilon_m + \varepsilon_i + \delta_i(\varepsilon_m - \varepsilon_i)} \quad (1)$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость матрицы, ε_i – диэлектрическая проницаемость включений, δ_i – объемная доля включений в матрице. В нашем случае можно считать рефрактивную фазу NaF, растущую в объеме ФТР стекла, включениями и принять ее объем и показатель преломления постоянными. Из данного приближения становится ясно, что при увеличении показателя преломления основной матрицы, а соответственно и эффективного показателя преломления, Δn увеличивается.

В работе были синтезированы и исследованы ФТР стекла натриевоцинкаломогерманосиликатной системы ($\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaBr}$), содержащие в составе CeO_2 , Sb_2O_3 и Ag_2O , с переменной концентрацией GeO_2 от 0 до 34.2 мол.%. Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температуре 1440 °С в кварцевых тиглях. Мешка осуществлялась платиновой мешалкой. Температура стеклования определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и составила от 478 °С до 515 °С в зависимости от состава. Полученные образцы облучались УФ-излучением ртутной лампы и обрабатывались в градиентной печи при температурах от 400 °С до 540 °С. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Lambda 650. Показатели преломления измерялись на рефрактометре Аббе ИРФ-454.

В работе показано:

- введение германия в ФТР стекло повышает его показатель преломления.
- зависимость температуры стеклования ФТР стекла от концентрации германия.
- зависимость плотности ФТР стекла от концентрации германия в нем.
- возможность записи фазовых голограмм в германосиликатном ФТР стекле.
- сравнение основных характеристик стандартного силикатного и германосиликатного ФТР стекла.

Список литературы

1. Ivanov S.A., Ignatiev A.I., Nikonov N.V. // Proc SPIE. 2015. V.9508. P.95080E.
2. Царевский Е.Н. Свойства и разработка новых оптических стекол. Л.: Машиностроение, 1977.
3. Levy O., Stroud D. // Physical Review B. 1997. V.56(13). P.8035.
4. Liu T., Pang Y., Zhu M., Kobayashi S. // Nanoscale. 2014. V.6 (4). P.2447-2454.

И.С. ПИЧУГИН, А.И. ИГНАТЬЕВ,
Д.А. КОЗЛОВА, К.В. ОРЕШКИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЛОГЕНОВ НА ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ

Представлены результаты исследования влияния концентрации Br и Cl на спектральные и голографические свойства фототерморефрактивных стекол. Получены зависимости положения пика плазмонного резонанса и амплитуды модуляции показателя преломления в брэгговских решетках от концентрации Br и Cl.

I.S. PICHUGIN, A.I. IGNATIEV, D.A. KOZLOVA, K.V. ORESHKINA
ITMO University, Saint-Petersburg

INFLUENCE OF HALOGENS ON THE HOLOGRAPHIC AND SPECTRAL PROPERTIES OF PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES

Result of influence of bromine and chlorine concentration on the spectral and holographic properties of photo-thermo-refractive glass are presented. The dependence of the position of the plasmon resonance peak and refractive index modulation amplitude in Bragg gratings on the concentration of bromine and chlorine have been studied.

Фототерморефрактивное (ФТР) стекло представляет собой светочувствительное натриевоцинкалюмосиликатное стекло, легированное церием, сурьмой, серебром, фтором и бромом. ФТР стекло известно еще с середины прошлого столетия как перспективный материал для записи брэгговских решеток. УФ облучение и последующая термообработка приводит к образованию наночастиц серебра и последующему росту кристаллов NaBr, AgBr и NaF на них в объеме стекла, что приводит к локальному изменению показателя преломления.

Бром в ФТР стекле играет основополагающую роль в процессе фототермоиндуцированной (ФТИ) кристаллизации [1], оказывает влияние на его спектральные и оптические характеристики [2-4]. Хлор и бром схожи между собой по химическим свойствам, однако ранее в ФТР стекло хлор не вводился. Хлор имеет меньшие показатели преломления

кристаллических оболочек NaCl и AgCl по сравнению с NaBr и AgBr соответственно. Использование хлора вместо брома позволит уменьшить общий показатель преломления облученного стекла и добиться большего изменения показателя преломления по сравнению с необлученной областью.

В работе были синтезированы и исследованы ФТР стекла натриевоцинкаломосиликатной системы ($\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaHal}$), где Hal = Cl или Br, содержащие в составе CeO_2 , Sb_2O_3 и Ag_2O , с переменной концентрацией NaHal от 0 до 3,15 мол.%. Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температуре 1440 °С в платиновых тиглях. Мешка осуществлялась платиновой мешалкой. Температура стеклования определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и для всех образцов составила примерно 473 °С. Полученные образцы облучались УФ-излучением ртутной лампы и обрабатывались в градиентной печи при температурах от 400 °С до 540 °С. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Lambda 650. Показатели преломления измерялись на рефрактометре Аббе ИРФ-454.

В работе показано:

- введение хлора и брома в ФТР стекло не влияет на положение полосы Ce^{3+} .
- динамика положения пика плазмонного резонанса наночастиц серебра в зависимости от концентрации галогенов и времени термообработки.
- рост кристаллической фазы NaF наблюдается в стеклах с концентрацией хлора и брома более 0,5 мол%.
- введение хлора и брома в ФТР стекло не влияет на температуру стеклования.
- изменение амплитуды модуляции показателя преломления (Δn) для стекол с разной концентрацией хлора и брома.

Список литературы

1. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. // Оптический журнал. 2014. Т.81. №6. С.72-77.
2. Glebova L., Lumeau J., Klimov M., Zanutto E.D., Glebov L.B. // Journal of Non-Crystalline Solids. 2008. V.354. P.456-461.
3. Лазарева К.Е., Акишина Е.Ю. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. Т.51. С.245-250.
4. Лазарева К.Е., Акишина Е.Ю., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2009. Т.60. С.5-16.

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**УЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВНЕШНИМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
СИСТЕМЫ ПОЛЯРИТОНОВ В РЕЗОНАТОРЕ МЕТОДОМ
КВАНТОВОГО МОНТЕ-КАРЛО**

Система экситонных поляритонов в резонаторе исследуется при помощи моделирования методом квантового Монте-Карло. Показана возможность учёта взаимодействия с внешним электромагнитным полем (оптическая накачка и уход фотонов из резонатора). Представлены результаты расчётов стационарного распределения частиц при различных параметрах задачи.

P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**ACCOUNTING THE INTERACTION
WITH EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD
IN THE QUANTUM MONTE CARLO SIMULATION
OF POLARITONIC SYSTEM IN RESONATOR**

The system of excitonic polaritons is studied using the quantum Monte Carlo simulation. We show the possibility of taking into account the interaction with external electromagnetic field, i.e. the optical pumping and the escape of photons from the resonator. The results of stationary particle distribution calculations for various problem parameters are presented.

В работе исследуется система экситонных поляритонов в резонаторе под действием оптической накачки [1]. Интерес к этой системе связан с возможностью достижения бозе-конденсации при достаточно высоких температурах, близких к комнатным [2, 3], а также с перспективами создания новых оптоэлектронных приборов и оптических преобразователей.

Гамильтониан системы записывается в виде (1):

$$\hat{H} = \sum E^{(e)} \hat{a}^+ \hat{a} + \sum E^{(p)} \hat{b}^+ \hat{b} + \hbar \Omega \sum (\hat{a}^+ \hat{b} + \hat{b}^+ \hat{a}) + \sum U_0 \hat{a}^+ \hat{a}^+ \hat{a} \hat{a} + \gamma \sum (\hat{b}^+ \hat{c} + \hat{c}^+ \hat{b})$$

(1)

Первые два слагаемых гамильтониана описывают законы дисперсии экситонов (\hat{a}^+ и \hat{a}) и фотонов (\hat{b}^+ и \hat{b}) соответственно, третье слагаемое соответствует рабиевским осцилляциям между этими двумя подсистемами, четвертое отвечает за двухчастичное взаимодействие в подсистеме экситонов. Последнее слагаемое описывает взаимодействие с внешним электромагнитным полем, т.е. переход фотонов между двумя подсистемами – в резонаторе (\hat{b}^+ и \hat{b}) и снаружи (\hat{c}^+ и \hat{c}). Взаимодействие с внешним электромагнитным полем соответствует оптической накачке и уходу фотонов из резонатора.

Задачи с гамильтонианом такого вида успешно исследуются при помощи методов квантового Монте-Карло [4] на дискретной решётке узлов. В данном случае основной трудностью является корректный учёт взаимодействия с внешним электромагнитным полем (оптическая накачка и уход фотонов из резонатора).

Для того чтобы исключить из рассмотрения внешние фотоны (сплошной спектр), приведём последнее слагаемое гамильтониана к виду $\Sigma(\eta \hat{b}^+ + \eta \hat{b})$. Это позволит применить метод квантового Монте-Карло в дискретном пространстве [5].

В докладе обсуждается расчёт коэффициентов η и η в зависимости от интенсивности и ширины полосы накачки, времени жизни фотонов в резонаторе. Приведены результаты моделирования при различных параметрах накачки, обсуждается влияние параметров на стационарное распределение частиц.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-02-02764.

Список литературы

1. Sun Y., Wen P., et al. // PRL. 2017. V.118. P.016602.
2. Van Vugt L.K., et al. // PNAS. 2011. V.108. No.2. P.10050-10055.
3. Rahimi-iman A., et al. // Phys. Rev. B. 2012. V.86. P.153308.
4. Kashurnikov V.A., Krasavin A.V., Zhumagulov Ya.V. // Physical Review B. 2016. V.23. P.235145.
5. Prokof'ev N.V., Svistunov B.V., Tupitsyn I.S. // Phys. Lett. A. 1998. V.238. P.253.

Б.Б. АВЕРБУХ, И.Б. АВЕРБУХ

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск***УСЛОВИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО
ЗЕРКАЛА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ОПТИКИ**

Получено условие реализации оптического магнитного зеркала на границе раздела вакуум – среда из электрических диполей.

B.B. AVERBUKH, I.B. AVERBUKH

*Pacific State University, Khabarovsk***THE CONDITION FOR THE REALIZATION
OF THE OPTICAL MAGNETIC MIRROR
FROM THE VIEWPOINT OF MOLECULAR OPTICS**

The condition for the realization of an optical magnetic mirror at the boundary of the vacuum-medium interface from electric dipoles is obtained.

При обычном отражении плоской s-поляризованной электромагнитной волны от плоской границы вакуум – среда из электрических диполей напряженности электрического поля падающей и отраженной волн противоположны друг другу. При отражения от магнитного зеркала [1, 2] такая ситуация характерна для магнитного поля.

В данной работе на основании анализа, проведенного в рамках молекулярной оптики в работе [3], показано, что, как и обычное зеркало, магнитное зеркало соответствует формулам Френеля, и получено микроскопическое условие его реализации. Рассматривается отражение поляризованной вдоль оси x плоской электромагнитной волны $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r})$ с частотой ω , волновым вектором $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ и вектором поляризации \mathbf{e}_0 от границы раздела вакуум – среда из электрических диполей. Среда представляется состоящей из плоскопараллельных монослоев электрических диполей, характеризующихся поляризуемостью $A = A' - iA''$. Поля диполей учитываются полностью. Все дипольные монослои лежат в плоскостях xy , пересекающих ось z в точках z_1, z_2, z_3, \dots . Расстояния между всеми монослоями по оси z равны a , причем $a \ll \lambda$, где λ - длина волны излучения. Диполи одного монослоя расположены неупорядоченно (с

плотностью N) и не взаимодействуют между собой. Размеры диполей много меньше расстояний между диполями, а также величин a и λ , где λ - длина волны излучения.

В [3] показано, что отраженная от среды волна определяется следующими выражениями для электрического и магнитного полей соответственно.

$$\mathbf{E}_R(x, y, z) = R_s \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1) ,$$

$$\mathbf{H}_R(x, y, z) = -R_s E_0 (\cos\alpha \mathbf{e}_y + \sin\alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1)$$

где $R_s = (k_{0z} - k_{2z}) / (k_{2z} + k_{0z})$ - коэффициент отражения Френеля. Здесь \mathbf{e}_y и \mathbf{e}_z - единичные векторы вдоль соответствующих осей, а $k_{2z} = k_{0z} + \varphi_d / a$ описывает z компоненту волнового вектора волны в среде. Величина φ_d определяет изменение фазы волны, обусловленное излучением дипольного монослоя. Если $\varphi_d > 0$, то $k_{2z} > k_{0z}$ и $R_s < 0$. При этом электрические поля падающей и отраженной волн противоположны друг другу. Магнитные поля этих волн параллельны друг другу. Если $\varphi_d < 0$, то $k_{2z} < k_{0z}$ и $R_s > 0$. В этом случае электрические поля падающей и отраженной волн параллельны друг другу. Магнитные поля этих волн направлены противоположно друг другу. Это соответствует магнитному зеркалу.

Таким образом, магнитное зеркало реализуется при $k_{2z} < k_{0z}$ или $\varphi_d < 0$.

Согласно [3], это соответствует условиям $2\pi NA' k^2 / k_{0z} \ll 1$ и $k_{0z} a \ll 1$.

Список литературы

1. Schwanecke A.S., Fedotov V.A., Khardikov V.V., Prosvirnin S.L., Chen Y., Zheludev N.I. Optical magnetic mirrors // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2007. V.9. P.L1-L2.
2. Choi S.B., Park D.J., Byun S.J., Jisoo K.J., Hwang S.W. Near-Zero Index: Optical Magnetic Mirror for Field Enhancement and Subwavelength Imaging Applications // Adv. Optical Mater. 2015. V.3. P.1719-1725.
3. Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Формирование отраженной и преломленной s-поляризованных электромагнитных волн в задаче Френеля с точки зрения молекулярной оптики // Известия вузов. Физика. 2015. Т.58. №12. С.83-88.

А.А. МИТЮРЕВА, Д.В. СМОРНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

КАЛИБРОВКА СЕЧЕНИЙ МНОГОФОТОННОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ПО СЕЧЕНИЯМ ИХ ЭЛЕКТРОННОЙ ИОНИЗАЦИИ

Рассмотрена методика получения совокупной информации по имеющимся данным для сечений процессов электронного возбуждения и ионизации атомов. Эта методика полезна для получения надежной информации по сечениям электронной ионизации при калибровке по ним сечений многофотонной ионизации атомов. Получены данные для атома криптона.

A.A. MITYUREVA, D.V. SMIRNOV
Saint Petersburg State University

CALIBRATION OF THE CROSS SECTIONS OF MULTIPHOTON IONIZATION OF ATOMS ON THE CROSS SECTIONS OF THEIR ELECTRONIC IONIZATION

A technique for obtaining aggregate information on available data for the cross sections of the processes of electronic excitation and ionization of atoms is considered. This technique is useful for obtaining reliable information on the cross sections of electron ionization during the calibration of the cross sections for multiphoton ionization of atoms. Data are obtained for the krypton atom.

Электронная и многофотонная ионизация атомов и молекул являются фундаментальными процессами столкновений. В то время, как процесс электронной ионизации атомов изучен достаточно хорошо, их многофотонная ионизация изучена в гораздо меньшей степени. Несмотря на интенсивные экспериментальные и теоретические исследования и быстрый прогресс в этой области, получение величин сечений многофотонной ионизации по-прежнему затруднителен, и неопределенность надежных значений остается.

В такой ситуации при измерении абсолютных величин сечений многофотонной ионизации естественно использовать калибровку на известные сечения электронной ионизации в том же эксперименте. Достоинством подхода является то, что нет необходимости измерять абсолютные значения концентрации атомов и ионов.

Такой подход был использован в наших работах по определению сечений трехфотонной ионизации атома ксенона [1].

При этом возникает проблема выбора надежного значения сечения электронной ионизации атома. Решению этой проблемы посвящены наши работы по представлению совокупной информации по имеющимся данным для сечений процессов электронного возбуждения и ионизации [2, 3]. Сечения находятся на основе отбора, анализа и регрессионной обработки имеющейся информации и представляются в компактной и удобной для приложений форме в виде параметров регрессии и относительной выборочной дисперсии, характеризующей разброс данных.

Мы рассматриваем четырех-параметрическую аппроксимацию зависимости сечения возбуждения (ионизации) электронным ударом Q от энергии электронов E в виде

$$Q(E) = p_0 \left(\frac{u}{u+1} \right)^{p_1} (u + p_2)^{-p_3}, \quad u = \frac{E}{\Delta E} - 1,$$

где E – энергия электронов, ΔE – порог процесса, $p = (p_0, p_1, p_2, p_3)$ – параметры. Очень приближенно можно считать, что p_0 задает величину сечения, а параметр p_2 влияет на форму кривой $Q(E)$ вблизи максимума и на его местоположение, параметр p_1 , отвечает за ход сечения у порога возбуждения, параметр p_3 учитывает разную асимптотику поведения сечения при больших энергиях налетающего электрона E .

На основе этого подхода в работе получены совокупные данные по процессам ионизации и возбуждения электронным ударом с каскадным заселением $4p^5 5p$ уровней атома криптона.

Список литературы

1. Mityureva A.A., Pastor A.A., Pavlov K.V., Serdobintsev P. Yu., Timofeev N.A. // Russian J. of Phys. Chem. B 2017. V.11. №1. P.9-11.
2. Митюрева А.А., Смирнов В.В. // Опт. и спектр. 2016. Т.121 №6. С.24-30.
3. Mityureva A.A., Smirnov V.V. // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Phys. and Math. 2015. V.1. P.372-380.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

РЭЛЕЕВСКОЕ РАССЕЙНИЕ ДВУХ ФОТОНОВ АТОМОМ

Теоретически исследован процесс рэлеевского (упругого) рассеяния двух рентгеновских фотонов многоэлектронным атомом. В области энергий рассеянного фотона $\hbar\omega \pm I_{1s}$ ($\hbar\omega$ – энергия падающего фотона, I_{1s} – энергия порога ионизации $1s$ – оболочки атома) предсказаны ярко выраженная резонансная структура и сильная угловая анизотропия дифференциального сечения рассеяния.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

RAYLEIGH SCATTERING OF TWO PHOTONS BY AN ATOM

Theoretically investigate the process of Rayleigh scattering of two X-ray photons by a many-electron atom. In the energy region with $\hbar\omega \pm I_{1s}$ ($\hbar\omega$ is the energy of the incident photon, I_{1s} is the energy of the ionization threshold of the $1s$ atomic shell) for the scattered photon we find a pronounced resonant structure and a strong angular anisotropy of differential scattering cross section.

Реализация концепции рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL [1]) открывает возможность исследования фундаментальных процессов нелинейного взаимодействия рентгеновского излучения с многоэлектронной системой. К нелинейным процессам, наряду, например, со слиянием фотонов в поле атома [2, 3] (атомы Ne, Ar) и комптоновским рассеянием двух фотонов атомом [4] (атом He), относится процесс рэлеевского рассеяния двух фотонов атомом [5] (атом He).

В данной работе мы строим нерелятивистское обобщение квантовой теории работы [5] на случай многоэлектронного атома. В качестве объекта исследования взят атом Ne. Результаты расчёта дифференциального сечения рассеяния, $\sigma_{\perp}^{(3)} \equiv d^3\sigma_{\perp} / d(h\omega_1) d\Omega_1 d\Omega_2$ (Ω_i – пространственный угол вылета рассеянного фотона), представлены на рис. 1. В областях энергий рассеянного фотона $\hbar\omega_1 \cong \hbar\omega \pm I_{1s}$ видна ярко выраженная резонансная структура спектра рассеяния. Таким образом, исследуемый процесс оказывается источником рождения с наибольшей вероятностью как «охлаждённых» ($\hbar\omega_1 \cong \hbar\omega - I_{1s}$), так и «горячих» ($\hbar\omega_1 \cong \hbar\omega + I_{1s}$)

рассеянных фотонов. В частности, для атома Zn ($I_{1s} = 9.66$ кэВ) при $\hbar\omega = 11$ кэВ следует ожидать практически двукратного увеличения энергии XFEL-фотона: $\hbar\omega \rightarrow \hbar\omega_1 = 20.66$ кэВ. Наряду с этим результатом установлен эффект сильной угловой анизотропии процесса: с наибольшей вероятностью два XFEL-фотона рассеиваются «назад» (эффект отражения; угол рассеяния $\cong 120^\circ \div 180^\circ$).

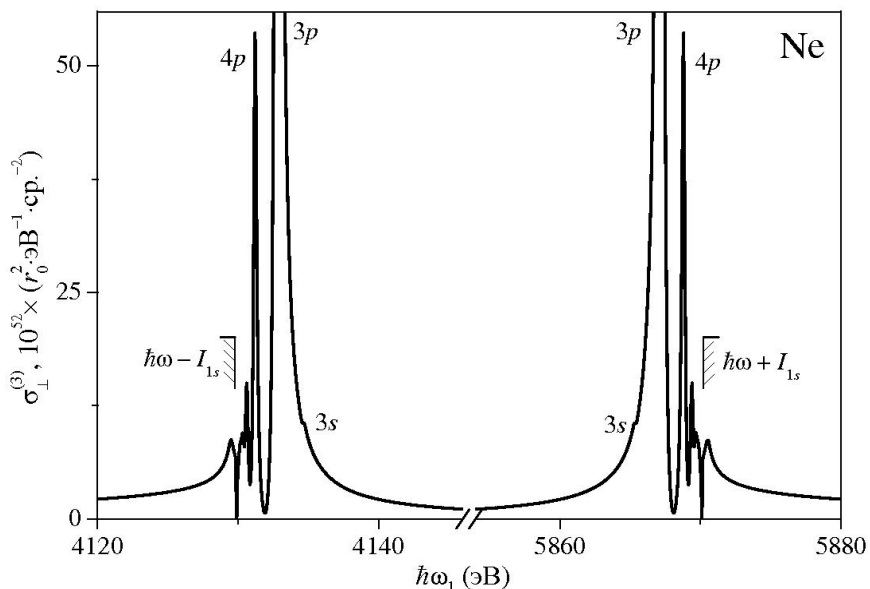


Рис. 1. Дифференциальное сечение рассеяния двух линейно поляризованных (перпендикулярно плоскости рассеяния, \perp) XFEL- фотонов атомом Ne. $\hbar\omega = 5$ кэВ, угол рассеяния 90° , $I_{1s} = 870.17$ эВ, ширина распада $1s$ -вакансии 0.27 эВ, $\hbar\omega_1$ – энергия рассеянного фотона, r_0 – классический радиус электрона

Список литературы

1. Tanaka T. // J. Opt. 2017. V.19. P.093001.
2. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М., Конеев Р.В. //Письма в ЖЭТФ. 2017. Т.105. С.535.
3. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A. // J. Phys. B. 2017. V.50. P.065601.
4. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A. // Phys. Rev. A. 2015. V.92. P.052709.
5. Hopersky A.N., Nadolinsky A.M., Novikov S.A. // Phys. Rev. A. 2016. V.93. P.052701.

Л.Е. СЕМЕНОВА

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

**РАССЕЯНИЕ СВЕТА
ПРИ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ
ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА С $A_{n=2}$ ЭКСИТОННЫМ УРОВНЕМ
В КРИСТАЛЛЕ GaN**

В работе представлены результаты теоретического исследования гиперкомбинационного рассеяния света на LO-фононах в кристалле GaN при двухфотонном возбуждении вблизи резонанса с $A_{n=2}$ экситонным уровнем с учетом влияния сложной структуры верхней валентной зоны.

L.E. SEMENOVA

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

**SCATTERING OF LIGHT UNDER TWO-PHOTON
EXCITATION NEAR RESONANCE
WITH THE $A_{n=2}$ EXCITON LEVEL IN A GaN CRYSTAL**

The paper presents the results of theoretical investigation of the hyper-Raman scattering of light by LO-phonons in a GaN crystal under two-photon excitation near resonance with the $A_{n=2}$ excitonic level, taking into account the influence of the complex structure of the top valence band.

Гиперкомбинационное рассеяние (ГКР) света является трехфотонным оптическим процессом и, следовательно, позволяет извлекать дополнительную информацию об электронных переходах и экситонных состояниях полупроводника. Представленная работа посвящена теоретическому исследованию ГКР на LO-фононах при двухфотонном возбуждении вблизи резонанса с $A_{n=2}$ экситонным уровнем в гексагональном кристалле GaN, верхняя валентная зона которого расщеплена на три близлежащие подзоны [1]. Процесс рассеяния рассматривается в рамках двухзонной модели, и учитываются только дипольно-разрешенные переходы и фрелиховский механизм экситон-фононного взаимодействия.

Вследствие сложной структуры верхней валентной зоны дипольные переходы возможны между экситонами, связанными как с одной, так и с разными подзонами. Приближенные оценки показали, что роль этих переходов между подзонами может оказаться важна при геометриях

рассеяния, при которых последовательности промежуточных экситонных состояний одной серии, s - p - s , не вносят вклад в ГКР.

Учитывая с помощью теории возмущения влияние анизотропии и сложной верхней валентной зоны, были получены поправки первого приближения к экситонному уровню энергии $A_{n=2}$ и соответствующим волновым функциям. Чтобы оценить роль этих поправок, был рассмотрен процесс ГКР, включающий двухфотонный переход на уровень $A_{n=2}$. Предполагалось, что возбуждающее излучение с поляризацией $\mathbf{\epsilon}_L \parallel x$, распространяется вдоль оси z , а рассеянный свет – перпендикулярно z и под углом $\pi/4$ к оси x . В этом случае при поляризации рассеянного света $\mathbf{\epsilon}_S \perp z$ в ГКР вносит вклад последовательность промежуточных экситонных состояний одной серии, а при $\mathbf{\epsilon}_S \parallel z$ рассматриваемый процесс рассеяния возможен только при учете поправок к волновым функциям (рис. 1а).

При геометрии рассеяния $y(x,x,y)z$ механизм ГКР, включающий двухфотонный переход на $A_{n=2}$ уровень, возможен только благодаря переходам между экситонами, относящимися к разным подзонам. Как показали приближенные оценки, учет поправок к волновым функциям в этом случае приводит к существенному уменьшению вклада этого процесса в сечение ГКР (рис. 1б).

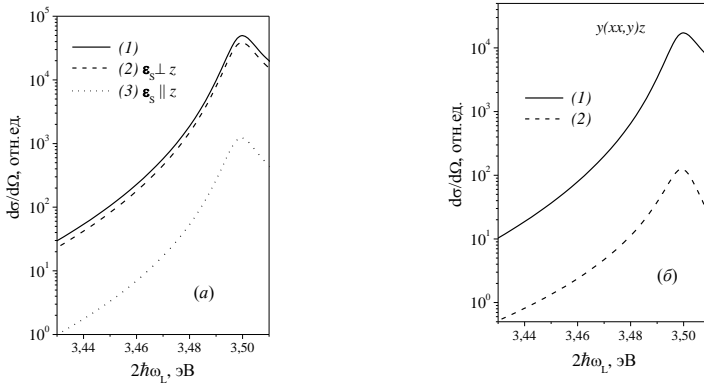


Рис. 1. Относительный вклад процесса ГКР, включающего двухфотонный переход на $A_{n=2}$ экситонный уровень, в сечение рассеяния в зависимости от удвоенной энергии фотонов возбуждающего излучения $\hbar\omega_L$ для невозмущенных волновых функций (1) и с учетом поправок (2,3)

Список литературы

1. Chen G.D., Smith M., Lin J.Y., Jiang H.X. // Appl. Phys. Lett. 1996. V.68. P.2784.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет***ЭНТРОПИЯ ШЕННОНА И ИНФОРМАЦИЯ ФИШЕРА
МОЛЕКУЛЫ H_2^+**

Рассчитаны зависимости от межъядерного расстояния информационной энтропии Шеннона и информации Фишера в координатном и импульсном пространствах для основного электронного состояний H_2^+ , используя результаты нашего расчета точных волновых функций. Установлено, что в области равновесного межъядерного расстояния информационные характеристики наиболее близки к пределу, соответствующему гауссовскому распределению.

S.A. ASTASHKEVICH

*Sankt-Petersburg State University***SHANNON ENTROPY AND FISHER INFORMATION
FOR THE H_2^+ MOLECULE**

The dependencies on the internuclear distance of the Shannon information entropy and the Fisher information in position and momentum spaces for the ground electronic states of H_2^+ are calculated using results of our calculation of the exact wave functions. It is established that information characteristics are most close to the Gaussian distribution limit in the region of the equilibrium internuclear distance.

Энтропия Шеннона и информация Фишера [1] широко используются в квантовой информатике, криптографии, метрологии и интерферометрии [2, 3]. В 3D случае для этих характеристик выполняются неравенства (в а.е.) [4]:

$$S[r]+S[p] \geq 3(1+\ln(\pi)), \quad (1)$$

$$I[r]I[p] \geq 36. \quad (2)$$

Здесь S и I – энтропия Шеннона и информация Фишера в координатном $[r]$ и импульсном $[p]$ пространствах. Равенство в этих выражениях имеет место в случае гауссовского распределения плотности вероятности.

Нами впервые были рассчитаны зависимости от межъядерного расстояния R энтропии Шеннона (рис. 1а) и информации Фишера (рис. 1б) в координатном и импульсном пространствах для основного электронного состояний H_2^+ , используя результаты нашего расчета точных волновых функций [5] по методике, описанной в работе [6]. Видна корреляция между зависимостями от R : 1) энтропии Шеннона и информации Фишера; 2) одних и тех же информационных характеристик

в координатном и импульсном пространствах, – если одна из зависимостей возрастает, то другая уменьшается, и наоборот.

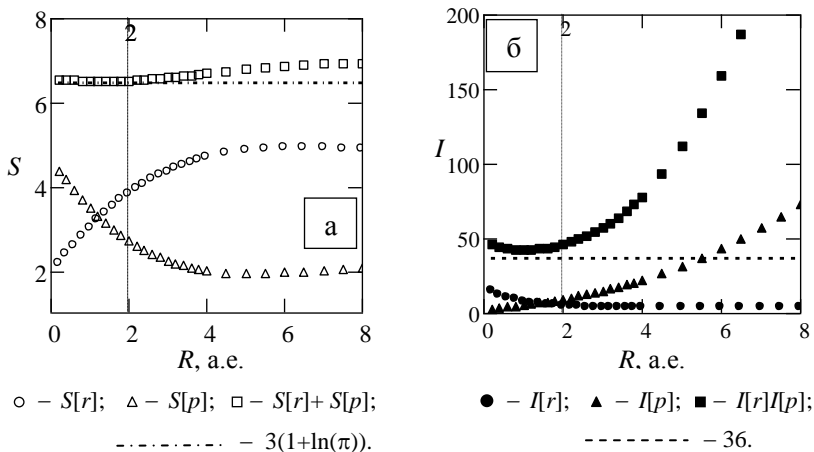


Рис. 1. Зависимости энтропии Шеннона S и информации Фишера I от межъядерного расстояния R для молекулы H_2^+

Также на рис. 1 горизонтальной пунктирной линией отмечен предел (см. формулы (1) и (2)) для комбинаций информационных характеристик ($S[r] + S[p]$ (рис. 1а) и $I[r]I[p]$ (рис. 1б)). Видно, что в области малых R вплоть до равновесного межъядерного расстояния ($R = 2$ а.е.) эти характеристики близки к гауссовскому пределу. При больших значениях R произведение $I[r]I[p]$ сильно нелинейно возрастает и значительно отличается от предельного значения. В то же время в этой области R отличие суммы $S[r] + S[p]$ от соответствующего предельного значения не превышает 10 %. Можно сделать вывод о том, что информация Фишера является более чувствительной, чем энтропия Шеннона, информационной характеристикой при описании зависимости плотности вероятности электронного распределения H_2^+ от межъядерного расстояния.

Список литературы

1. Асташкевич С.А. // Опт. и спектр. 2017. Т.122. №3. P.369.
2. Coles P.J., Berta M., Tomamichel M., Wehner S. // Rev. Mod. Phys. 2017. V.89. P.015002.
3. Czekaj Ł., Przysiężna A., Horodecki M., Horodecki P. // Phys. Rev. A. 2015. V.92. P.062303.
4. Statistical Complexity / ed. by K.D. Sen. London, New York: Springer, 2011.
5. Astashkevich S.A. // Phys. Lett. A. 2017. V.381. №31. P.2554.
6. Wind H. // J. Chem. Phys. 1965. V.42. №7. P.2371.

Б.Б. АВЕРБУХ, И.Б. АВЕРБУХ

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

ВЫХОД ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ВОЛН ЗА ПРЕДЕЛЫ МЕТАМАТЕРИАЛА И НЕВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ СУПЕРЛИНЗЫ

Показано, что область существования обратных волн выходит за пределы метаматериала, что приводит к нарушению условий функционирования суперлинзы.

B.B. AVERBUKH, I.B. AVERBUKH

Pacific State University, Khabarovsk

EXIT OF THE AREA OF EXISTENCE OF BACKWARD WAVES OUTSIDE THE METAMATERIAL AND IMPOSSIBILITY OF REALIZATION OF THE SUPERLENS

It is shown that the region of existence of backward waves extends beyond the metamaterial. And this leads to a violation of the conditions for the operation of the superlens.

Концепция суперлинзы основана на способности плоскопараллельного слоя материала с отрицательными значениями диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей фокусировать излучение точечного источника. Эффект основан на том, что слой с $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ усиливает неоднородные волны в излучении источника и при $\varepsilon = \mu = -1$ это усиление точно компенсирует затухание этих волн в областях перед слоем и после него. При тех же условиях отрицательный набег фазы бегущих волн при распространении в пределах слоя точно компенсирует положительный набег фазы этих волн в областях перед слоем и после него.

Анализ и критика концепции суперлинзы связаны в основном с усилением неоднородных волн. Как показано в настоящей работе, проблема возникает и с распространяющимися волнами. В метаматериале распространяются обратные волны, т.е. волны, у которых направление волнового вектора противоположно вектору Пойнтинга. Микроскопический анализ, проведенный в данной работе показывает, что область существования обратных волн выходит за пределы среды.

Поэтому отрицательный набег фазы при распространении обратных волн увеличивается, а положительный при распространении обычных волн (до и после метаматериала) уменьшается и их полной компенсации уже не происходит.

Настоящая работа является продолжением [1], в которой распространение s – поляризованного электромагнитного излучения в метаматериале рассмотрено с точки зрения молекулярной оптики. Метаматериал состоит из периодически расположенных плоскопараллельных монослоев, составленных из точечных элементов Гюйгенса. Элементы Гюйгенса – это частицы с электрической ($A_d = A_d' - iA_d''$) и магнитной ($A_m = A_m' - iA_m''$) поляризуемостями. Индуцированные электрические d и магнитные m дипольные моменты взаимно перпендикулярны и колеблются в фазе.

Пусть на первый монослой со стороны $z < z_1$ под углом α падает поляризованное вдоль оси x поле $E_0 = E_0 e_0 \exp(i\omega t - ik_0 r)$ с частотой ω , волновым вектором $k_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ и вектором поляризации e_0 . В этом случае, как показано в [1], за диэлектрическим слоем распространяется поле (т.е. прошедшее через диэлектрик поле), у которого z компонента волнового вектора равна $k_{3z} = k_{0z} + \varphi_{dm}/b$, где φ_{dm} описывает изменение фазы волны, обусловленное излучением монослоя. Величина k_{3z} зависит от расстояния b между точкой наблюдения и диэлектрическим слоем. Если $\varphi_{dm} = -|\varphi_{dm}| < 0$, то при $b < |\varphi_{dm}|/k_{0z}$ величина k_{3z} отрицательна, что соответствует области существования обратных волн. Выход области существования обратных волн за пределы метаматериала на обеих границах (перед входной и после выходной) был ранее получен в результате численных вычислений в работе [2]. Физический механизм этого явления не исследовался. Проведенный анализ показывает, что выход области существования обратных волн за пределы среды является следствием интерференции электромагнитных волн и должен наблюдаться как при неупорядоченном (рассматриваемом в данной работе), так и при упорядоченном распределении элементов в монослое.

Список литературы

1. Averbukh B.B., Averbukh I.B. Formation of the reflected and refracted s -polarized electromagnetic waves in the Fresnel problem for the boundary vacuum-metamaterial from the viewpoint of molecular optics // Proc SPIE. 2016. V.10176. P.1017601.
2. Kissel V.N., Lagar'kov A.N. Superresolution in left-handed composite structures: From homogenization to a detailed electrodynamic description // Phys. Rev. 2005. B72. P.085111.

Д.Н. АРХИПОВ, С.А. АСТАШКЕВИЧ,
А.А. МИТЮРЕВА, В.В. СМИРНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ФОТОИОНИЗАЦИИ ИОНА МОЛЕКУЛЫ ВОДОРОДА ТРАЕКТОРНЫМ МЕТОДОМ

Траекторный метод для вычисления вероятностей перехода в квантовой системе, разработанный в наших предыдущих работах и проверенный на атомах, применён для вычисления вероятности фотоионизации простейшей молекулы – молекулярного иона водорода. Установлено хорошее согласие с результатами. Метод работает в широком диапазоне величин поля, включая суператомные величины вплоть до релятивистской интенсивности.

D.N. ARKHIPOV, S.A. ASTASHKEVICH,
A.A. MITYUREVA, V.V. SMIRNOV
Saint Petersburg State University

STUDY OF PHOTOIONIZATION DYNAMICS OF THE HYDROGEN MOLECULAR ION BY THE TRAJECTORY-BASED METHOD

The trajectory-based method for calculating the transitions probabilities in a quantum system developed in our previous works and tested for atoms is applied to calculate the photoionization probability for the simplest molecule - hydrogen molecular ion. A good agreement with reliable published results is established. The method works in a wide range of the field magnitudes including superatomic values up to relativistic intensity.

Рассмотрен процесс фотоионизации молекулярного иона водорода в ультракоротком лазерном поле. Этот процесс представляет интерес с точки зрения изучения деградации под действием ультракороткого лазерного импульса многоцентровых квантовых объектов, как изолированных молекул, так и конденсированного вещества. Для вычисления вероятностей перехода, использовался траекторный метод, разработанный в наших работах [1, 2]. Этот метод непертурбативен и учитывает все порядки многофотонных и повторных процессов. Вероятности фотоионизации были рассчитаны в широком диапазоне частот и интенсивностей полей. Это предоставляет уникальные возможности по сравнению с другими методами. В расчётах

использовалась аппроксимация электронной волновой функции Коулсона (Coulson) для H_2^+ , соответствующая методу МО ЛКАО (см. [3]).

Нами была рассчитана зависимость вероятности фотоионизации от времени в промежуточном поле. Используемый в нашей работе импульс имел гауссову форму с амплитудой и энергией фотонов, как в [4, 5], а именно параметр Фейсала $\chi = 0.15$ и энергию фотона $E = 5.4$ эВ. Длительность импульса составляла $\tau = 9$ фс. Наш импульс сравнительно медленно увеличивается до значений, рассмотренных в цитируемых работах, а затем медленно отключается. Это является причиной разного временного изменения вероятности фотоионизации, полученного в нашей работе и в [4, 5]. Величина вероятности вблизи максимума нашего фотоимпульса при $\tau = 9$ фс близка к значениям в указанных работах (рис. 1). Результаты наших расчётов хорошо согласуются с данными, полученными другими методами.

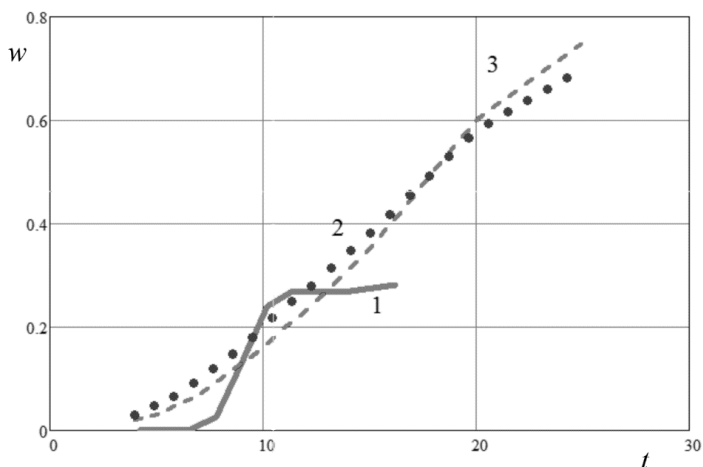


Рис. 1. Зависимость вероятности фотоионизации w молекулы H_2^+ от времени t (фс), линия 1 – настоящая работа; линии 2 и 3 – расчет по данным [4] и [5]

Список литературы

1. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Rezikyan A.G., Smirnov V.V. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2017. V.50. P.195601.
2. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Opt. and Spectr. 2017. V.123. №3. P.338–343.
3. Astashkevich S.A. // Phys. Lett. A. 2017. V.381. №31. P.2554.
4. Chelkowski S., Zuo T., Atabek O., Bandrauk A.D. // Phys. Rev. A. 1995. V.52. №4. P.2977.
5. Uhlmann M., Kunert T., Grossmann F., Schmidt R. // Phys. Rev. A. 2003. V.67. №1. P.013413.

К.К. ЗВИНЕНКО, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**СТРУКТУРИРОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА
УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН**

Приведены результаты экспериментов по формированию полых микроканалов в объёме кварцевого стекла (КУ-1), полученных с помощью лазерной обработки пикосекундными импульсами с длинами волн 355, 532 и 1064 нм и последующего травления в плавиковой кислоте (HF). Изучено влияние выбора длины волны излучения на модификацию структуры кварцевого стекла.

R.A. ZAKOLDAEV, K.K. ZVINENKO, M.M. SERGEEV
ITMO University, Saint-Petersburg

**STRUCTURING OF THE QUARTZ GLASS
USING ULTRASHORT LASER PULSES
OF DIFFERENT WAVELENGTHS**

Presents the result of experiments on the formation of hollow microchannels in the volume of quartz glass (KU-1) obtained by laser treatment with picosecond pulses using 355, 532 and 1064 nm wavelength and subsequent etching in hydrofluoric acid (HF). Were determined the influence of the wavelength choice on the modification of the structure of quartz glass.

Кварцевое стекло широко распространено в природе, обладает уникальными свойствами, в частности, устойчивостью к химическим, биологическим и бактериологическим воздействиям [1]. С другой стороны, плавленый кварц тяжело поддается микрообработке. Поэтому способы модификации структуры стеклообразных материалов, широко изучаемые в последние годы для различных областей применения, по-прежнему остаются богатым полем для исследования [2].

Лазерное излучение пико- и фемтосекундной длительности является высокоточным инструментом для структурирования как поверхности оксида кремния, так и его локальной модификации в объеме материала [2-4]. Совмещая лазерную обработку и последующее химическое травление в объёме кварцевого стекла можно получить полые микроканалы, которые широко применяются в микрофлюидике, МЭМС-структурах и биомедицине [5, 6].

Целью работы является экспериментальное исследование влияния длины волны на модификацию структуры кварцевого стекла. В качестве источника излучения использовался импульсный пикосекундный лазер EXPLA PL 2143, с длинами волн $\lambda = 1064, 532, 355$ нм, длительностью импульсов $\tau = 30$ нс и частотой их следования $f = 10$ Гц. Излучение фокусировалось объективом с $NA = 0.4$ и увеличением $20\times$. Химическое травление проводилось в ультразвуковой ванне, использовалась плавиковая кислота 5 и 10 % концентраций. Степень деградации структуры материала стекла оценивалась по скорости травления. В ходе экспериментов выяснено (рис. 1 и 2), что линии, записанные на образцах при одинаковых условиях, но используя разные длины волн, травятся по-разному: чем больше длина волны, тем больше наблюдаемая скорость травления. Предполагается, что это может быть связано с эффектом многофотонного поглощения: в случае с длиной волны в 1064 нм, в нём участвует больше фотонов, что несёт за собой больший ущерб структуре оксида кремния. Также, чтобы исключить влияние диаметра линии на скорость травления, были записаны линии с одинаковым поперечным размером, которые экспериментально показали аналогичную зависимость.

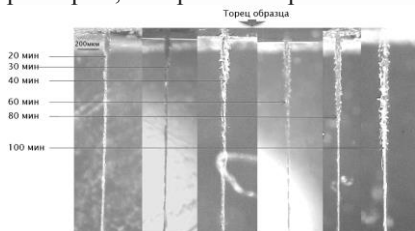


Рис. 1. Микрофотографии формирования канала, $\lambda=1064$ нм, 5% HF, плотность энергии $0,6$ Дж/см², слева указано время пребывания образца в кислоте

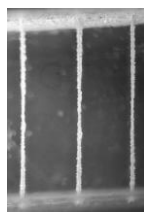


Рис. 2. Оптическая микроскопия каналов в объёме кварцевого стекла, $\lambda=1064$ нм, 10% HF, время травления 100 мин

Список литературы

1. Griffin J.M., et al. In situ NMR and electrochemical quartz crystal microbalance reveal the structure of the electric double-layer in supercapacitor electrodes. 2015.
2. Madou M.J. Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization. 2002.
3. Cao X.D., Kim B.H., Chu C.N. Micro-structuring of glass with features less than $100\mu\text{m}$ by electrochemical discharge machining // Precision Engineering. 2009. V.33. №4. P.459-465.
4. Li X., et al. Fabrication of high-density electrical feed-throughs by deep-reactive-ion etching of Pyrex glass // Journal of Microelectromechanical Systems. 2002. V.11. №6. P.625-630.
5. Paiè P., et al. Straightforward 3D hydrodynamic focusing in femtosecond laser fabricated microfluidic channels // Lab on a Chip. 2014. V.14. №11. P.1826-1833.
6. Sugioka K., et al. Femtosecond laser 3D micromachining: a powerful tool for the fabrication of microfluidic, optofluidic, and electrofluidic devices based on glass // Lab on a Chip. 2014. V.14. №18. P.3447-3458.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН¹

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРЕШЕТОК В СИСТЕМЕ УКИ
ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИЙ
ГАЗ – ОСАЖДАЕМЫЙ МЕТАЛЛ – САПФИР
В СИНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ ПОЛЕ
С УЧАСТИЕМ ВОЛНОВОДНЫХ МОД**

Предложена модель формирования металлических решеток аномальной ориентации на поверхности сапфировой подложки при разложении металлоорганического газа лазерным излучением. Модель включает образование термического волновода в сапфире и осаждение металла в интерференционном поле, образованном с участием волноводных мод.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN¹

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instruments Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region*

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

**NANOGRATINGS PRODUCTION IN SYSTEM USP LASER
PULSES – METALLOORGANIC GAS – DEPOSITED METAL –
SAPPHIRE IN SINERGETIC INTERFERENCE FIELD
WITH WAVEGUIDE MODES PARTICIPATION**

The model for anomalously oriented metal film grating production on the sapphire substrate in conditions metalloorganic gas decomposition was suggested. The model involves the thermal waveguide formation and metal deposition in interference field with waveguide modes participation.

Модель образования термического волновода в поверхностно-активной среде для УКИ излучения не работает, поскольку, в отличие от случая полевого волновода [1], он возникает после окончания лазерного импульса. Рассмотрим экспериментальные данные [2] по осаждению пленок вольфрама путем разложения металлоорганического газа на подложку из сапфира, инициированное ультракороткоимпульсным (УКИ) лазерным излучением ($\lambda = 400$ нм, $\tau = 90$ фс, $\nu = 75$ МГц) сравнительно невысокой интенсивности в условиях сканирования излучения. В результате нанесенная пленка вольфрама оказывается

наноструктурированной с периодом $\sim (150-160)$ нм, $g \perp E$, а величина периода увеличивается с ростом скорости сканирования (v). Гребни рельефа решетки g при этом оказываются промодулированными, с периодом 25 нм, $G \parallel E$. Физический механизм процесса синергетического структурирования пленки остается неизвестным. Для его выяснения предложен подход, основанный на универсальной поляритонной модели лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред. Учтем высокую величину v (75 МГц) и температурную зависимость показателя преломления сапфира ($\frac{dn}{dT} = 1,41 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$) [3]. Оценки показывают, что

в процессе сканирования импульсов по поверхности происходит накопление тепла, формирование локального пространственно ограниченного приповерхностного волновода и возбуждение в нем волноводных мод (ВМ) ТЕ типа. Интерференция ВМ с падающей волной образует стоячую волну. В поле стоячей волны происходит пространственно неоднородное разложение газа и осаждение вольфрама на подложку. Период стоячих волн дается неравенствами:

$$\frac{1}{n + \frac{dn}{dT} \Delta T} \leq \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{n}, \text{ ориентация структур } g \perp E, \text{ где } n - \text{ показатель}$$

преломления сапфира, ΔT – увеличение температуры в поверхностном слое сапфира. Увеличение величины v приводит к уменьшению ΔT и знаменателя в левой части неравенства (1), т.е. к возможному увеличению периода образующихся структур, что коррелирует с экспериментом [2]. Образование ортогональных нанорешеток с периодом $d = \lambda/16\zeta = 25$ нм ($\zeta \approx 1$) обусловлено взаимной интерференцией волноведомых выступом основного рельефа клиновых поверхностных плазмон поляритонов, распространяющихся в противоположных направлениях [4].

В заключение, предложена модель формирования металлической решетки с периодами порядка λ/n в поле динамически сформированной структуры, образованной интерференцией ВМ термически индуцированного волновода и падающей волны. Высокое качество получаемых решеток обусловлено высоким качеством создаваемой динамической электромагнитной интерференционной картины.

Список литературы

1. Макин В.С., Пестов Ю.И., Макин Р.С. // Оптический журнал. 2017. Т.123. №2. С.264.
2. Zhang H., et al. // Optics Express. 2007. V.15. P.5337-5347.
3. Акустические кристаллы /под ред. С.В. Корышева. М.: Наука, 1982.
4. Макин В.С., Макин Р.С. // Оптический журнал. 2016. Т.120. №4. С.118-123.

О.В. МИНИНА^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

РЕЖИМ ВОЛНОВОДА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ

На основе дифракционно-лучевого подхода рассмотрено формирование волноводов при филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Определены условия реализации волноводного режима.

O. V. MININA^{1,2}

¹National Research Tomsk State University

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

THE WAVEGUIDE REGIME DURING FILAMENTATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN AIR

The formation of waveguides during filamentation of powerful femtosecond laser pulses in air is considered on a basis of the diffraction-beam approach. Conditions for the realization of the waveguide regime are determined.

Особенностью распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в среде является их самофокусировка и филаментация [1, 2]. В работе [3] была подробно рассмотрена динамическая картина самофокусировки. Это позволило установить, что интегральная картина филаментации формируется за счет образования в каждый момент времени специфических световых структур.

В данной работе рассматривается формирование дифракционных волноводов при филаментации лазерных импульсов титан-сапфирового лазера в воздухе. Моделирование распространения фемтосекундных лазерных импульсов проводилось на основе численного решения нелинейного уравнения Шредингера. Анализ результатов численных экспериментов осуществлялся в рамках дифракционно-лучевого подхода, подробно описанного в работах [3-5].

Волновод формируется вблизи оси распространения после прохождения нелинейного фокуса пучка, что видно на рис. 1а, где показана пространственная картина дифракционных лучей для гауссова пучка радиусом $R_0 = 2$ мм с пиковой мощностью $P_0 = 6P_c$ (критическая

мощность $P_c = 3,2$ ГВт) для центрального временного среза. На рис. 1 дистанция распространения Z нормирована на длину Релея L_r , а поперечная координата R на начальный радиус пучка R_0 .

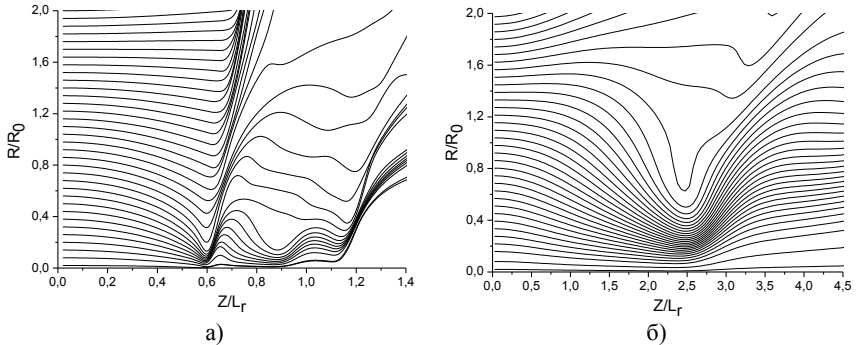


Рис. 1. Дифракционные лучи в нормированных переменных вдоль трассы для пучка радиусом $R_0 = 2$ мм и мощностью $P_0 = 6P_c$ (а), $P_0 = 2P_c$ (б)

Волновод захватывает в себя часть пучка и обеспечивает ее приосевое распространение на некотором расстоянии. На рис. 1а оно составляет около $0,55L_r$. В этой области формируются зоны с экстремальными значениями интенсивности светового поля, где образуется плазменные каналы. Существование волновода поддерживается за счет дифракционного взаимодействия с внешней частью пучка.

Однако формирование волноводов происходит не всегда. Уменьшение мощности лазерного излучения приводит к возникновению лишь одного фокуса (рис. 1б). Его положение изменяется в каждый момент времени, что дает картину аналогичную модели движущихся фокусов [1, 2]. Для лазерного пучка радиусом $R_0 = 2$ мм волноводный режим в центральном временном срезе реализуется при мощности $P_0 \approx 2,3P_c$.

Список литературы

1. Self-focusing: Past and present // Topics in Applied Physics / Eds. R.W. Boyd, et al. Berlin: Springer, 2009. P.605.
2. Чекалин С.В., Кандидов В.П. // УФН. 2013. Т.183 (2). С.133-152.
3. Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geint Yu.E., et. al. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2016. V.29 (5). P.395-403.
4. Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geints Yu.E. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V.27 (6). P.463-474.
5. Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geints Yu.E. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2012. V.25 (2). P.97-105.

М.П. СМАЕВ, В.В. ДОРОФЕЕВ¹, А.Г. ОХРИМЧУК

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

¹Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,

Нижний Новгород

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОМОДОВОГО ВОЛНОВОДА В ОБЪЕМЕ ТЕЛЛУРИТНОГО СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Исследованы режимы фемтосекундной модификации показателя преломления в объёме вольфрамат-теллуридного стекла с добавкой оксида висмута. Создан канальный волновод с неизменённой сердцевиной и модифицированной оболочкой с пониженным показателем преломления, сформированной набором записанных лазером треков. Было зафиксировано и исследовано уширение спектра фемтосекундного излучения при его распространении через записанный волновод. Уширение обусловлено высокой керровской нелинейностью исследованного стекла, превышающей нелинейность кварцевого стекла приблизительно в 30 раз.

M.P. SMAYEV, V.V. DOROFEEV¹, A.G. OKHRIMCHUK

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

¹G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,

Nizhny Novgorod

CREATION OF SINGLE MODE WAVEGUIDE IN THE BULK OF TELLURITE GLASS BY FEMTOSECOND LASER PULSES

The regimes of femtosecond laser modification of refractive index in the bulk of tungstate- tellurite oxide glasses doped with bismuth ions were studied. The channel waveguide with unchanged core and cladding formed by a number of inscribed tracks with depressed refractive index was created. We registered and studied the broadening of femtosecond irradiation spectra while propagating through the waveguide. The broadening is due to high Kerr nonlinearity of the glass studied, which exceeds the nonlinearity of fused silica by approximately 30 times.

Теллуридные стёкла обладают высокой прозрачностью в ближнем и среднем ИК-диапазонах и представляют интерес для создания источников и преобразователей излучения вследствие высоких значений оптической нелинейности. Фемтосекундная модификация показателя преломления привлекательна возможностью создания микроструктур в объёме материала. В работе представлены исследования взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с вольфрамат-теллуридными

стёклами, выделяющимися среди других стёкол этого класса повышенными значениями нелинейного показателя преломления.

Путём формирования серий треков были детально исследованы режимы модификации показателя преломления пучком лазера с длиной волны 1030 нм, сфокусированным под поверхностью образца объективом с $NA = 0.85$. Применяли импульсы с длительностью 180 фс, с различными энергиями в импульсе, частотами повторения, скоростями сканирования. После определения оптимальных режимов для получения гладких треков с пониженным показателем преломления была осуществлена запись волновода с немодифицированной сердцевиной и оболочкой, состоящей из 32 треков. Было продемонстрировано одномодовое ведение излучения (рис. 1), потери при распространении через волновод длиной 15 мм составляли 0.15 дБ/см.

Были изучены свойства фемтосекундного излучения ($\tau = 300$ фс) при прохождении по волноводу. Излучение заводилось с полированного торца с помощью двухлинзовой системы. С выходного торца образца прошедшее через волновод излучение собиралось и анализировалось с помощью высокочувствительного спектрометра. Было зафиксировано и исследовано уширение спектральной линии (рис. 2), которое может быть объяснено фазовой самомодуляцией пучка при распространении в канале с высокой оптической нелинейностью.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009) и РФФИ (грант № 15-43-02185).

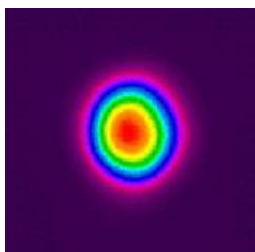


Рис. 1. Изображение моды на выходе из волновода в теллуридном стекле ($\lambda = 1030$ нм, $P = 5$ мВт, $\tau = 300$ фс, диаметр моды $d = 14$ мкм)

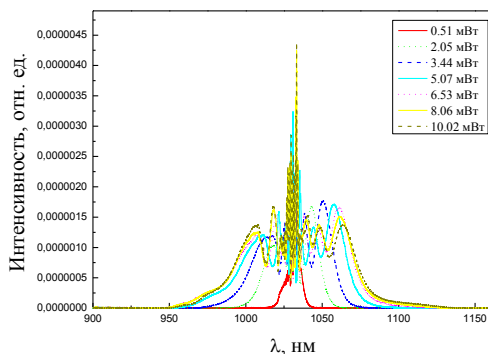


Рис. 2. Спектр излучения, прошедшего волновод в теллуридном стекле при различных заводимых мощностях ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 300$ фс)

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН¹*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»***МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ СТЕКЛА ИМПУЛЬСОМ
НАНОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УНИВЕРСАЛЬНАЯ
ПОЛЯРИТОННАЯ МОДЕЛЬ**

Проанализированы экспериментальные результаты по взаимодействию импульса наносекундного лазерного излучения с кварцевым стеклом. Показано, что характеристики образующихся микро- и нанорешеток разрушения хорошо объясняются в универсальной поляритонной модели.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN¹*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instruments Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region*¹*National research nuclear university MEPHI (Moscow engineering physics institute)***QUARTZ GLASS ORDERED STRUCTURING
BY NANOSECOND LASER PULSE
AND UNIVERSAL POLARITON MODEL**

The experimental results about nanosecond laser pulse interaction with quartz glass have discovered the ordered gratings of damage which were well explained in framework of universal polariton model of laser-induced material damage.

Одной из проблем физики взаимодействия импульсов лазерного излучения со стеклами является объяснение механизма образования упорядоченных решеток разрушения. На основе анализа экспериментальных данных по взаимодействию излучения наносекундной длительности ($\lambda = 1060$ нм, $\tau = 12$ нс, $Q = 50$ Дж/см²) [1] с кварцевым стеклом обнаружена аналогия картины разрушения с таковой при взаимодействии ультракоротких импульсов. На выходной поверхности кварцевого стекла образуются линейные решетки g ориентации $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}_t$ и периодами $d = \frac{\lambda}{\eta} = \frac{\lambda}{n\xi} \approx (639 \div 666)$, $\xi = (1,06 \div 1,16)$ (рис. 1), которые хорошо укладываются в рамки универсальной поляритонной модели. Здесь \mathbf{E}_t – тангенциальная компонента вектора напряженности

электрического поля лазерного излучения, n – показатель преломления стекла, λ – длина волны лазерного излучения.

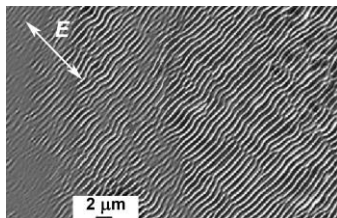


Рис. 1. Картина разрушения кварцевого стекла

Подробное изучение картины разрушения при высоких $Q \geq 50 \text{ Дж/см}^2$ обнаруживает решетки \mathbf{G} аномальной ориентации ($\mathbf{G} \perp \mathbf{E}_t$), покрывающие выступы (см. рис. 1) и впадины основного рельефа, имеющие периоды, кратные λ : $D = \lambda / 2\xi \approx 480 \text{ нм}$ (см. рис. 1) и $D = \lambda / 16\xi \approx 48 \text{ нм}$, связанные со взаимной интерференцией клиновых (канальных) поверхностных плазмон поляритонов (ППП), распространяющихся вдоль волноведущей структуры [3]. Для реализации поляритонной модели в импульсе лазерного излучения стекло должно металлизироваться ($n_e \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$), что осуществимо при существенно высоких плотностях энергии лазерного излучения $Q \leq 70 \text{ Дж/см}^2$. Перечисленные особенности разрушения стекла, включая треки микроструктур в направлении распространения ППП (см. рис. 1), аналогичны особенностям разрушения стекла ультракороткими импульсами излучения. В пользу металлизации стекла свидетельствуют и опыты ($\lambda = 1064 \text{ нм}$, $\tau = 8 \text{ нс}$) по регистрации импульса обратно отраженного лазерного излучения длительностью 200 пс [4]. Следовательно, можно утверждать, что для стекла так же, как для металлов и полупроводников, разрушение с образованием упорядоченных структур в режимах воздействия ультракоротких и длинных (наносекундных) импульсов излучения хорошо объясняется с использованием универсальной поляритонной модели.

Список литературы

1. Sun W., Qi H., Fang Zh., Yu Z., Yi K., Shao J. // Applied Surface Science. 2014. V.309. P.79-84.
2. Макин В.С., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2012. Т.112. №2. С.193-198.
3. Макин В.С., Логачева Е.И., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т.120. №4. С.641-646.
4. Ефимов О.М. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. Санкт-Петербург, 1995.

А.Н. СИВЕРС, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ, М.М. СЕРГЕЕВ, Г.К. КОСТЮК,
В.П. ВЕЙКО, И.Н. АНФИМОВА¹, Т.В. АНТРОПОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург*

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ БАРЬЕРОВ В ПОРИСТОМ СТЕКЛЕ

Представлены экспериментальные результаты по лазерно-индуцированной модификации структуры пористого стекла с целью создания молекулярного барьера с избирательной проницаемостью по отношению к расположенным в порах молекулам. Результаты свидетельствуют о возможности сепарации раствора, состоящего из молекул различного размера, а также создания твердотельной матрицы для хранения и исследования различных веществ.

A.N. SIVERS, R.A. ZAKOLDAEV, M.M. SERGEEV,
G.K. KOSTYUK, V.P. VEIKO, I.N. ANFIMOVA¹, T.V. ANTROPOVA¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Grebenshchikov Institute of Chemistry of Silicates of the RAS, Saint-Petersburg*

LASER-INDUCED FORMATION OF MOLECULAR BARRIERS INSIDE OF POROUS GLASS

Experimental results on the laser-induced modification of the structure of porous glass with the aim of creating a molecular barrier with selective permeability with respect to the molecules located in the pores are presented. The results indicate the possibility of separation of a solution consisting of molecules of different sizes, as well as the creation of a solid-state matrix for storage and research of various substances.

Нанопористые среды получили широкое применение при создании интегральных микродиагностических устройств, которые используются в различных областях исследований [1, 2]. Для проведения манипуляций на молекулярном уровне, а также детального исследования реакций необходимыми являются оптически прозрачные и физически стойкие пористые матрицы [3]. Пористое стекло (ПС), представляющее собой диэлектрическую среду, пронизанную насквозь порами и каналами, хорошо подходит в качестве матрицы для захвата реагента и аналита благодаря высокой степени адсорбции [4, 5].

В этом исследовании был изучен способ лазерно-индуцированного создания областей уплотнения, массив из которых представляет

молекулярный барьер с избирательной проницаемостью по отношению к расположенным в порах молекулам. Локальное лазерное уплотнение структуры ПС проводилось фемтосекундными лазерными импульсами ($\lambda = 0.515$ мкм, $F = 500$ кГц, $\tau = 200$ фс, $v = 0.2-4$ мм/с, $E = 1.5-2$ мДж) при перемещении пластины ПС относительно сфокусированного (рис. 1а) лазерного пучка (объектив ЛОМО, 10X, $NA = 0.25$) [6]. Для создания молекулярного барьера в объеме ПС была записана серия линий уплотнения со сдвигом (рис. 1б). В целях обеспечения поверхностной герметичности барьера была проведена обработка поверхностей ПС излучением CO_2 -лазера ($\lambda = 10.6$ мкм, $\tau = 190$ мкс, $q = 2.8 \cdot 10^4$ Вт/см²). Созданием двух ортогональных молекулярных барьеров были сформированы четыре независимых ячейки в пластине ПС, которые могут быть использованы для хранения и диагностических исследований различных неорганических и органических соединений (рис. 1в).

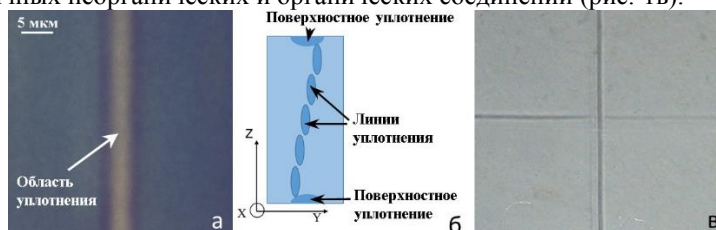


Рис. 1. Область локального уплотнения фемтосекундными лазерными импульсами (а), схема формирования молекулярного барьера (б), пластина ПС с двумя ортогональными молекулярными барьерами (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение №14.587.21.0037 (RFMEFI58717X0037).

Список литературы

1. Hopwood A.J., et al. Integrated microfluidic system for rapid forensic DNA analysis: sample collection to DNA profile // Analytical chemistry. 2010. V.82(16). P.6991-6999.
2. Marle L., Greenway G.M. Microfluidic devices for environmental monitoring // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2005. V.24(9). P.795-802.
3. Liao Y., et al. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing // Lab on a Chip. 2012. V.12(4). P.46-749.
4. Esikova N.A., et al., Study Features of the Change of the Fluorescence Signal of the Sensor Element Based on Porous Glass on the Concentration of Labeled Insulin // Glass Physics and Chemistry. 2015. V.41(1). P.89-92.
5. Reisfeld R., et al. Porous glasses as a host of luminescent materials, their applications and site selective determination // Journal of Luminescence. 2016. V.169. Part B. P.440-444.
6. Veiko V.P, et al. Femtosecond laser-induced stress-free ultra-densification inside porous glass // Laser Physics Letters. 2016. V.13(5). P.055901.

Л. ЧЖУН^{1,2}, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ¹, М.М. СЕРГЕЕВ¹, В.П. ВЕЙКО¹,
М.А. ГИРSOVA³, Т.В. АНТРОПОВА³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Уайчжунский университет науки и технологий, Ухань, Китай

³Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург

ПРОСТРАНСТВЕННО-СЕЛЕКТИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ Bi ВНУТРИ ПОРИСТОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Представлены экспериментальные результаты по лазерно-индуцированной модификации структуры пористого стекла, предварительно допированного висмутом (Bi). Результаты свидетельствуют о возможности локальной стабилизации Bi-активных центров внутри пластин пористого стекла.

L. ZHONG^{1,2}, R.A. ZAKOLDAEV¹, M.M. SERGEEV¹, V.P. VEIKO¹,
M.A. GIRSOVA³, T.V. ANTROPOVA³

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

³Grebenshchikov Institute of Chemistry of Silicates of the RAS, Saint-Petersburg

SPACE-SELECTIVE STABILIZATION OF Bi ACTIVE CENTERS INSIDE POROUS GLASS BY LASER PULSES

The experimental results on laser-induced local modification of PG by nanosecond pulsed laser were presented. The possibility for space-selective stabilization of Bi active centers inside Bi-doped PG was demonstrated.

В отличие от узкополосной люминесценции традиционных активных центров, таких как ионы лантанида и переходных металлов, ионы висмута (Bi) показывают широкополосных спектров люминесценции от видимой до ближней ИК области спектра, и обладают длительным временем жизни флуоресценции [1]. Таким образом, интерес к Bi-активированным фотонным материалам значительно вырос за последнее десятилетие, где они нашли применение в создании широкополосных оптических усилителей, волоконных лазеров [2]. Нанопористые материалы, такие как, пористые стекла (ПС), являются подходящей матрицей для захвата и стабилизации активных центров Bi [3]. С одной стороны, это связано со слабым взаимодействием между активными центрами Bi и кремнезёмным каркасом (SiO₂). Локальное изменение структуры таких матриц,

например, сфокусированными лазерными импульсами, может обеспечить пространственно-избирательный контроль этих активных центров [4]. С другой стороны, уникальные свойства ПС позволят избежать кластеризации ионов V_i и эффекта концентрационного тушения люминесценции. В работах [1-3] V_i -допированные ПС изготавливались при их пропитке в V_i -содержащих растворах с последующей термообработкой в воздушной либо специальной атмосфере. После процедуры термообработки схлопывание нанопор обеспечивает стабилизацию V_i -активных центров по всей толщине образца [5].

В этом исследовании предложено заменить этап термообработки в печи на локальное лазерное уплотнение структуры ПС наносекундными лазерными импульсами ($\lambda = 1.064$ мкм, $\nu = 20$ кГц, $P = 10\text{-}19$ Вт, $\tau = 200$ нс) при перемещении V_i -допированной пластины ПС относительно сфокусированного (объектив ЛОМО, 20X, $\text{NA}=0.4$) лазерного пучка. В результате подобного воздействия удалось сформировать модифицированные области внутри пластин ПС (рис. 1а). Для обеспечения сквозной фотоактивации пластин ПС был использован источник лазерного излучения с ультракороткой длительностью импульсов ($\lambda = 0.355$ мкм, $\tau = 30$ пс, $E = 50$ мкДж). В результате была достигнута сквозная фотоактивация V_i -допированных ПС (рис. 1б).

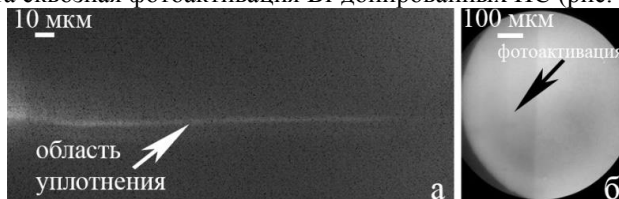


Рис. 1. Микрофотографии: область локального уплотнения наносекундными лазерными импульсами (а) и сквозной фотоактивации V_i -допированного ПС пикосекундными лазерными импульсами (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.587.21.0037 (RFMEFI58717X0037). Экспериментальные образцы были изготовлены при поддержке ФАНО России (Государственное задание ИХС РАН, тема № 0097-2015-0021).

Список литературы

1. Zhou S., et al. // Advanced Functional Materials. 2008. V.18(9). P.1407-1413.
2. Sun H.T., Zhou J., Qiu J. // Progress in Materials Science. 2014. V.64. P.1-72.
3. Firstov S.V., et al. // Glass Physics and Chemistry. 2014. V.40(5). P.521-525.
4. Sergeev M.M., et al. // Glass Physics and Chemistry. 2017. V.43. No.5. P.395-398.
5. Girsova M.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.541. P.012022.

В.В. ДЕМИДОВ¹, В.А. АНАНЬЕВ^{1,2}, Е.В. ТЕР-НЕРСЕСЯНЦ¹
¹*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*
²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЫСШЕЙ МОДЫ В ЛАЗЕРНЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ С ПРЕДЕЛЬНО НИЗКОРАЗМЕРНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Приведены результаты работ по адаптации концепции оптических волокон с двойной отражающей оболочкой к микроструктурам на основе кварцевого стекла и воздуха, внутренняя оболочка которых отличается вращательной симметрией предельно низкой размерности, и изучению влияния геометрии этой оболочки на интенсивность делокализации высшей моды в сердцевине диаметром 100 мкм.

V.V. DEMIDOV¹, V.A. ANANYEV^{1,2}, E.V. TER-NERSESYANTS¹
¹*Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*
²*ITMO University, Saint-Petersburg*

HIGHER-ORDER MODE DELOCALIZATION CAPABILITY IN MICROSTRUCTURED FIBER LASERS WITH EXTREMELY LOW SYMMETRY

The paper presents the results on the adaptation of the concept of optical fibers with a double reflecting cladding to microstructures made from silica and air, whose inner cladding is characterized by the rotational symmetry of extremely low dimensionality, and studying the effect that geometrical parameters of this cladding has on the higher-order mode delocalization capability in a 100 μm core.

Кварцевые микроструктурированные световоды с большой (диаметром в несколько десятков микрометров) сердцевинной позиционируются как перспективные материалы фотоники для создания мощных волоконных лазеров с высоким порогом проявления нелинейно-оптических эффектов и дифракционно-ограниченным качеством светового пятна [1]. Наличие в конструкции таких элементов наружной отражающей оболочки, с одной стороны, обеспечивает механизм накачки активной области сердцевины, однако, с другой, – препятствует делокализации высших мод за пределы сердцевины и внутренней оболочки, особенно в условиях существенной тепловой нагрузки [1, 2]. По этой причине создание структур с большой сердцевинной, обеспечивающих селективное усиление фундаментальной моды, является актуальной задачей в сфере лазерных технологий [3].

Цель работы заключалась в адаптации концепции оптических волокон с двойной оболочкой к микроструктурам с сердцевинной диаметром 100 мкм и вращательной симметрией предельно низкой размерности (C_{2V}) и исследовании влияния геометрических параметров внутренней оболочки на интенсивность делокализации высшей моды (рис. 1).

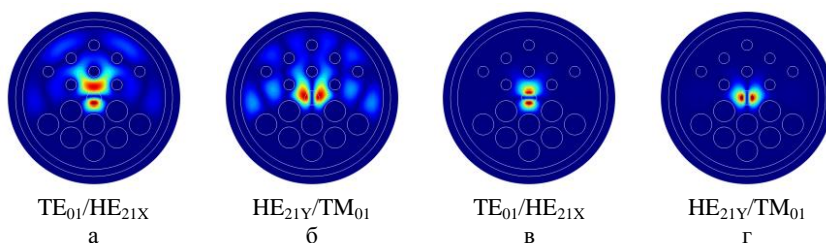


Рис. 1. Распределение электрического поля четырех поляризационных компонент первой высшей моды в условиях тепловой нагрузки, определяемой изменением показателя преломления активной области сердцевинной, легированной ионами иттербия на 50 %: $\Delta n = +5 \cdot 10^{-5}$ (а, б) и $\Delta n = +10 \cdot 10^{-5}$ (в, г), длина волны 1.05 мкм

Как видно из рис. 1, симметрия вращения C_{2V} во внутренней оболочке была получена разделением набора пустот на две изолированные группы согласно отношению $d_2/d_1 = 0.50$ (d_1 и d_2 – диаметры больших и малых пустот соответственно). В рамках описанной геометрии оболочки четыре поляризационные компоненты высшей моды классифицировались двумя ортогональными распределениями электрического поля с парами мод TE_{01}/HE_{21X} и HE_{21Y}/TM_{01} , демонстрирующих эффект делокализации поля в направлении пустот малого размера. Сравнение рис. 1а, б и 1в, г показывает, что двукратное увеличение тепловой нагрузки значительно увеличило удержание высшей моды в активной области. Однако 30-45 % делокализации высшей моды и 80-85 % локализации фундаментальной моды было достигнуто в световодах с сердцевинной, легированной ионами иттербия на 45-50 %. Указанной величины достаточно для селективного усиления мощности фундаментальной моды в схеме волоконного лазера.

Список литературы

1. Stutzki F., Jauregui C., et al. // Proc. SPIE. 2016. V.9886. P.98860B.
2. Stutzki F., Jansen F., et al. // Opt. Lett. 2011. V.36. P.689-691.
3. Limpert J., Stutzki F., et al. // Light Sci. Appl. 2012. V.1. P.e8.

В.В. ДЕМИДОВ¹, С.О. ЛЕОНОВ², В.А. АНАНЬЕВ^{1,3},
В.О. ТИГАЕВ², Е.А. ЕЛИСТРАТОВА²

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

³Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА И СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДОВ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ ДИАМЕТРОМ 50 мкм

Численно и экспериментально проанализированы возможности двух базовых концепций полых антирезонансных световодов (оптическое волокно с безузловой структурой капилляров и оптическое волокно с отрицательной кривизной границы раздела «сердцевина-оболочка») для передачи излучения в условно одномодовом режиме по сердцевине диаметром ~ 50 мкм в спектральном диапазоне от 600 до 2400 нм.

V.V. DEMIDOV¹, S.O. LEONOV², V.A. ANANYEV^{1,3},
V.O. TIGAEV², E.A. YELISTRATOVA²

¹Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

²Bauman Moscow State Technical University

³ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF MODAL CONTENT AND SPECTRAL TRANSMISSION OF ANTI-RESONANT MICROSTRUCTURED FIBERS WITH A HOLLOW CORE OF 50 μm IN DIAMETER

The capabilities of two basic concepts of hollow-core anti-resonant waveguides (optical fiber with a nodeless capillary structure and optical fiber with a negative curvature of the core-cladding boundary) for transmitting radiation in the quasi single-mode regime of operation over a core of ~ 50 μm in diameter within the spectral range 600-2400 nm are analyzed numerically and experimentally.

Микроструктурированные световоды с полой сердцевинной, принцип работы которых основан на явлении антирезонансного отражения света, привлекают внимание уникальными свойствами и междисциплинарными приложениями (высокоэффективное взаимодействие лазерного излучения с веществом [1], транспорт ультракоротких импульсов [2], компрессия

импульсов [3], передача оптических сигналов с минимальными потерями мощности в среднем инфракрасном диапазоне [4] и др.).

Целью работы было численное и экспериментальное исследование модового состава и спектральных характеристик пропускания кварцевых световодов с большой, диаметром ~ 50 мкм, сердцевинной, базирующихся на двух известных концепциях (рис. 1), в диапазоне от 600 до 2400 нм.

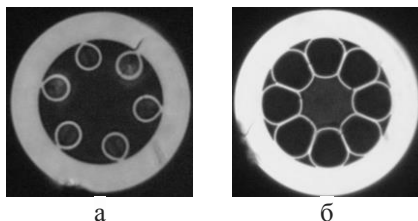


Рис. 1. Реализованные антирезонансные световоды с безузловой структурой капилляров (внешний диаметр 130 мкм) (а) и отрицательной кривизной границы раздела «сердцевина-оболочка» (внешний диаметр 190 мкм) (б)

Как показали исследования, световод на рис. 1а характеризуется областями пропускания на длинах волн 600, 650-700, 750-800, 850-950, 1000-1100, 1150-1350, 1450-1750 и 1900-2400 нм, а световод на рис. 1б – 650, 750, 850-900, 950-1050, 1150-1300, 1450-1700 и 2000-2300 нм. При этом окно прозрачности в среднем инфракрасном диапазоне для первого оптического элемента более выражено с позиции спектральной ширины и относительного пропускания ввиду большей толщины кварцевых стенок, формирующих сердцевину (2 и 1.5 мкм соответственно). Отличительной особенностью световода на рис. 1а является квазиодномодовый режим распространения оптических сигналов во всем исследованном диапазоне спектра, обусловленный высоким, на уровне нескольких дБ/м, затуханием излучения группы высших направляемых мод. В оптическом элементе второго типа аналогичный режим работы наблюдается при смещении в длинноволновую область благодаря увеличению разности эффективных показателей преломления фундаментальной и высшей моды.

Список литературы

1. Russell P.St.J., Holzer P., et al. // Nat. Photonics. 2014. V.8. P.278-286.
2. Jaworski P., Yu F., et al. // Opt. Express. 2015. V.23. P.8498-8506.
3. Mak K.F., Seidel M., et al. // Opt. Lett. 2015. V.40. P.1238-1241.
4. Chen Y., Saleh M.F., et al. // Opt. Lett. 2017. V.42. P.1285-1288.

Д.В. ГАНИН, К.Э. ЛАПШИН, С.К. ВАРТАПЕТОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

**МЕТОДЫ УДЛИНЕНИЯ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
С ПРОЗРАЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ
ВЫСОКОСКОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Приведены результаты экспериментов по исследованию методов удлинения области фокального объема в направлении распространению фемтосекундных лазерных импульсов. Продемонстрировано удлинение фокального объема за счет линейных эффектов – интерфейсной сферической аберрации, самодифракции пучка, и нелинейных эффектов – керровской самофокусировки. Определены условия и причины формирования протяженных нитевидных микромодификаций с диаметрами 2 мкм и длиной более 100 мкм в образцах поликарбоната при использовании различных методов удлинения области взаимодействия.

D. V. GANIN, K. E. LAPSHIN, S. K. VARTAPETOV
Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

**METHODS OF ELONGATION OF FEMTOSECOND LASER
PULSES WITH TRANSPARENT MATERIALS INTERACTION
REGION FOR HIGH SPEED AND PRECISION MATERIAL
PROCESSING**

The results of experiments on the study of methods of the focal volume elongation in the direction of the propagation of femtosecond laser pulses are given. The lengthening of the focal volume due to linear effects - interface spherical aberration, beam self-diffraction, and nonlinear effects - Kerr self-focusing is demonstrated. The conditions and reasons for the formation of extended filamentary micromodifications with diameters about 2 μm and a length of more than 100 μm in polycarbonate samples using different methods of extending the interaction region are determined.

Фемтосекундные (фс) лазеры предоставляют отличные возможности для прецизионной обработки объема прозрачных материалов. Однако при наличии сферических аберраций или при нелинейных эффектах, форма внутренних микромодификаций может сильно отличаться от сферы и иметь вид нитей (филаментов), форма и размеры которых зависят от параметров ФС лазера, образца и условий эксперимента [1-3]. Причинами

этого могут являться керровская самофокусировка [3], пространственная модуляция лазерного пучка [4, 5] и другие.

Целью работы является экспериментальное исследование методов удлинения области взаимодействия одиночных фс лазерных импульсов с объемом прозрачных материалов. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Мы использовали фемтосекундный лазер ($E_{\text{им}} = 150$ мкДж, 1025 нм, 400 фс). В качестве фокусирующих систем были использованы фокусирующие системы различных конструкций с числовыми апертурами от 0.1 до 0.6.

Использование фокусирующих систем со сравнительно низкими числовыми апертурами (до 0.2) и лазерных импульсов, чья пиковая мощность превышает порог самофокусировки, может приводить к реализации условий филаментации излучения в среде прозрачных материалов, и как следствие, к формированию нитевидной микромодификации. Длина получаемых микромодификаций определяется в первую очередь пиковой мощностью импульса, однако вторым важным фактором является радиальное распределение интенсивности лазерного пучка.

Фокусировка фс лазерных импульсов объективами с высокими числовыми апертурами приводит к возникновению сильной интерфейсной сферической аберрации и трансформации фокального пятна в объеме прозрачного материала в нить, длина которой линейно зависит от глубины фокусировки излучения.

Все исследованные методы удлинения микромодификаций позволяют существенно увеличить скорость и качество обработки при проведении таких технологических операций как лазерная резка и сверление.

Работа поддержана грантом «УМНИК» фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере 10624ГУ/2016.

Список литературы

1. Vartapetov S.K., Ganin D.V., et al. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (8). P.725.
2. Ganin D.V., Obidin A.Z., et al. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (11). P.1029.
3. Couairon A., Sudrie L., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V.71. P.125435.
4. Ganin D.V., Obidin A.Z., Lapshin K.E., Vartapetov S.K. // Proc. of ICOM 2015. 2015. P.48.
5. Dergachev A.A., et al. // Laser Phys. Lett. 2015. V.12.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В.П. ВЕЙКО, В.К. ЛЬОНГ, Г.В. ОДИНЦОВА,
В.В. РОМАНОВ, Р.М. ЯЦУК
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Показаны метод послойного наращивания оксидных пленок на поверхности титана и расчет их толщин во время импульсного лазерного воздействия. Повышена производительность процесса цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) за счет увеличения частоты следования импульсов вплоть до 1 МГц.

V.P. VEIKO, V.C. LUONG, G.V. OGINSOVA,
V.V. ROMANOV, R.M. YATSUK
ITMO University, Saint-Petersburg

OPTIMIZATION OF COLOR LASER MARKING TECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL APPLICATION

The method of layer by layer growth of oxide films on titanium surface and calculation of its thicknesses under pulsed laser action was demonstrated. The efficiency of color laser marking (CLM) was enhanced due to increase of laser pulses frequency up to 1 MHz.

В настоящее время технология лазерной маркировки позволяет получать цветные изображения на металлической продукции с высоким разрешением, без использования красок и других химикатов [1]. Данная технология может применяться в различных областях промышленности с целью идентификации, декорирования или защиты от фальсификации продукции [2-4].

Для получения цветных изображений на поверхности металлов используется технологическая установка «Минимаркер-2» [5] на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны 1064 нм, длительностью импульсов $\tau = 4-100$ нс, частотой следования $f = 20-1000$ кГц, средней мощностью $P_{cp} = 1-20$ Вт. Сканирование осуществлялось лазерным пятном с диаметром в фокусе $d_0 = 50$ мкм со скоростью сканирования $V = 1-250$ мм/с.

Для управления цветовыми характеристиками поверхности титана предложен метод послойного наращивания или испарения оксидной пленки заданной толщины за счет наложения цветов, полученных при различных режимах лазерного воздействия (плотность мощности (q) составляет $9,3 \cdot 10^7$ Вт/см², коэффициенты перекрытия по оси X (L_x) 99,3 %, по оси Y (L_y) в диапазоне 66 % - 94 %). Показан расчет толщины оксидной пленки (для каждого цвета), полученной при импульсном лазерном воздействии на воздухе в зависимости от режимов облучения.

Известно, что производительность ЦЛМ в несколько раз ниже монохромной гравировки. Показано, что использование режимов лазерного воздействия с повышенной частотой следования импульсов (до 1 МГц) позволяет увеличить производительность ЦЛМ до 30 раза, что становится сравнимым с монохромной гравировкой.

Таким образом, метод послойного наращивания или удаления оксидной пленки, а также увеличение производительности процесса позволяет оптимизировать технологию ЦЛМ для промышленного внедрения.

Список литературы

1. Вейко В.П., Одинцова Г.В., Карлагина Ю.Ю., Агеев Э.И., Андреева Я.М., Горбунова Е.В. Способ цветной маркировки поверхности металла или его сплава лазерным импульсным излучением. Патент на изобретение №2616703 от 18.04.2017.
2. 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.
3. Veiko V., Odintsova G., Gorbunova E., Ageev E., Shimko A., Karlagina Yu., Andreeva Ya. Development of complete color palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of color laser marking technology // Material and Design. 2016. V.89. P.684-688.
4. Khafaji N.Y., et al. Optical characterization of laser coloured titanium under different processing atmospheres //Surface and Coatings Technology. 2017. V.321. P.156-163.
5. Минимаркер Home page [Электронный ресурс] / Минимаркер – Electronic data. –Режим доступа: <http://www.minimarker.ru>.

М.Г. ГАЛУШКИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –
филиал ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВ

Аналитическим приближённым методом описаны энергетический баланс и кинетика температурного поля в процессе наплавки порошков, когда высота их слоя изменяется во время воздействия лазерного пучка. Определены условия согласования основных технологических параметров.

M.G. GALUSHKIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura*

PECULIARITIES OF THERMAL PARAMETERS OF LASER POWDER SURFACING

The approximate analytical method has been employed to describe the energy balance and temperature field kinetics in the course of powder surfacing, when the powder layer height is varied during exposure to the laser beam. The conditions of matching of the basic process parameters have been considered.

Лазерная наплавка металлических порошков является главной операцией аддитивных технологий обработки материалов, например восстановления изношенных деталей и создания объёмных изделий сложной формы. Существуют два способа наплавки: с предварительным нанесением тонкого слоя порошка и с доставкой его потоком газа в область воздействия лазерного пучка (газолазерная наплавка). Для второго способа характерным является изменение высоты валика в течение характерного времени воздействия на материал лазерного пучка $\tau_b \approx d_0/v$, где d_0 - диаметр лазерного пучка на облучаемой поверхности, v - скорость его сканирования (перемещения). Для точного учёта этого фактора следует рассматривать нагрев материала, размер которого увеличивается навстречу лазерному пучку. В тоже время, рост высоты наплавляемого валика можно учитывать, используя среднее время воздействия излучения на массу материала валика $\bar{\tau}_b$, которое связано с характерным временем воздействия на валик с постоянной толщиной

приближённым соотношением $\bar{\tau}_b \approx 0,5\tau_b$. После замены τ_b на $\bar{\tau}_b$ можно результаты, полученные в [1] для постоянной высоты валика, использовать для определения теплофизических параметров газолазерной наплавки порошков. В рамках предложенного приближённого метода поверхность материала за время воздействия τ_b нагревается в $\sqrt{0,5}$ раз меньше, чем в случае постоянной высоты слоя с теми же J_0 , ν , d_0 и h .

В приближениях, которые использовались в [1], для оценки глубины зоны плавления ΔZ_m , расположенной ниже наплавленного валика и обеспечивающей термическое соединение с нижележащими валиками, в том числе и с основой, нетрудно получить соотношение:

$$\Delta Z_m \approx \sqrt{\chi\tau_b} - \frac{aT_m}{J_0} - h, \quad (1)$$

где χ – коэффициент температуропроводности, a – коэффициент теплопроводности, T_m – температура плавления, J_0 – интенсивность излучения на облучаемой поверхности, h – высота наплавленного валика. Для газолазерной наплавки, как уже отмечалось, τ_b в (1) заменяется на $\bar{\tau}_b = 0,5\tau_b$. Поэтому из (1) следует, что величина ΔZ_m уменьшается с ростом скорости в обоих способах наплавки. В газолазерной наплавке ΔZ_m меньше, чем в случае предварительно нанесённого слоя.

В таких же приближениях глубина зоны термического воздействия (ЗТВ), в которой нагрев не превышает температуру плавления, оценивается как $\Delta Z_T \approx aT_m/J_0$. Следует отметить, что используемое приближение по динамике поля температуры [1] даёт наибольшую погрешность на краю пространственного распределения температуры [2], где и находится ЗТВ. В частности, ЗТВ в газолазерной наплавке порошков должна быть больше, чем при наплавке предварительно нанесённого слоя, потому что температура облучаемой поверхности в первом случае меньше, а поглощаемая энергия, при равных ν , J_0 , d_0 и h , одинаковая.

Список литературы

1. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Pyichev I.N., Misyurov A.T. // Inorganic Material: Applied Research. 2014. V.5. №3. P.199-203.
2. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В. // Физика и химия обработки материалов. 2012. №1. С.5-9.

Д.Р. ЯББАРОВА, Р. САЛИХОВ, Л.В. ХАБИБУЛЛИНА
*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

ГРАФИТИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ УГЛЕПЛАСТИКА

Благодаря своим уникальным характеристикам таким, как легкость и прочность, углепластик широко используется в различных отраслях современной промышленности, в том числе и в ракетостроении, например, при изготовлении топливных баков или раскатных баллонов [1]. И одной из новейших технологий раскроя углеродного композиционного материала является лазерная резка. В данной работе мы провели исследование изменения структуры углепластика после такой его обработки.

D.R. IABBAROVA, R. SALIKHOV, L.V. HABIBULLINA
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

GRAPHITIZATION OF THE CARBON FIBER WRAP DURING LASER CUTTING OF CARBON PLASTIC

Due to its unique characteristics such as lightness and strength, carbon plastic is widely used in various fields of modern industry, including rocketry, for example, in the manufacture of top-quality tanks or rolling cylinders [1]. And one of the newest technologies for cutting carbon composite material is laser cutting. In this paper, we carried out a study of the structure changing of the carbon after such treatment.

Рентгенофазовый анализ структуры поверхности лазерного реза проводился с помощью многофункционального дифрактометра Rigaku SmartLab. Исследование образца проводили в сравнении с образцом механического реза того же материала. Съемка дифрактограмм проводилась в режиме симметричной съемки в геометрии Брэгга-Брентано. Полученные с дифрактометра данные представлены на рис. 1, сравнительное (наложенное) представление обеих дифрактограмм - рис. 2.

На дифрактограмме образца механической обработки (рис. 1а) представлены исключительно широкие дифракционные пики, положение и форма которых характерны для ряда слабоупорядоченных (аморфных) структур углерода, таких как сажа, углеродные луковичные структуры, углеродное волокно. На дифрактограмме образца лазерного раскроя углерод-углеродного композиционного материала (рис. 1б), помимо вышеуказанных пиков, присутствует выраженный узкий дифракционный

пик, который соответствует межплоскостному расстоянию, равному 3,42 А. Данная величина межплоскостного расстояния близка по значению к межплоскостному расстоянию (002) в структуре графита (3,35 А) [2].

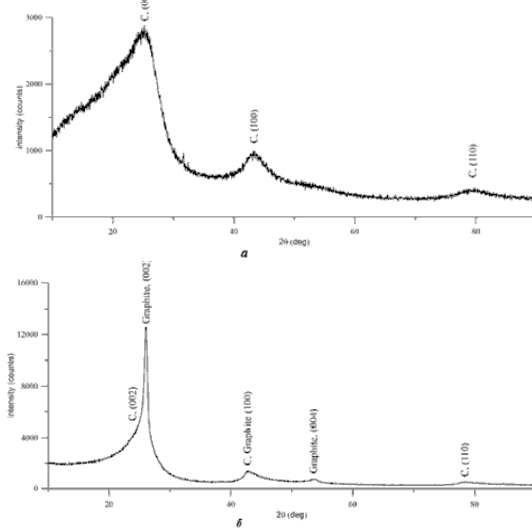


Рис. 1. Дифрактограммы образцов: механической резки (а), лазерной резки (б)

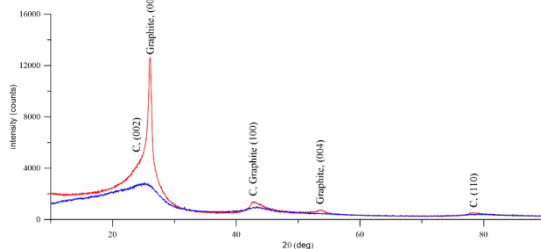


Рис. 2. Сравнительное представление дифрактограмм двух образцов

Таким образом, можно утверждать, что в результате лазерного воздействия происходит «графитизация» поверхности углеродного волокна. В результате образуются структуры, в которых наблюдается упорядоченная укладка графеновых слоев вдоль линии реза [3].

Список литературы

1. Bondaletova L.I., Bondaletov V.G.// Polymer composite materials. 2013. V.118. P.36-41.
2. Freitag C., Onuseit V. et al. // Journal of Applied Physics. 2014. V 186. P.93-104.
3. Finger J, Weinand M., et al. // Journal of Laser Applications. 2013. V.258. P.71-75.

М.Г. ГАЛУШКИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ОТДАЧИ ПАРОВ И ЗАВИСИМОСТИ ЕГО ОТ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ ПУЧКА В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

В рамках «поршневой» модели удаления расплава из облучаемой зоны, используя условие согласования скорости сканирования пучка, нагрева с испарением и удаления слоя расплава получены количественные оценки величины давления отдачи паров частично испаряемого материала и установлена зависимость давления от скорости сканирования пучка. Представлено уравнение энергетического баланса для лазерной сварки с глубоким проплавлением с учётом частичного испарения и теплопроводных потерь..

M.G. GALUSHKIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura*

DETERMINATION OF VAPOR RECOIL PRESSURE AND ITS DEPENDENCE ON BEAM SCANNING VELOCITY IN DEEP-PENETRATION LASER WELDING

In the context of the “piston” model of melt removal from the irradiated zone, using the condition of matching the beam scanning velocity, heating of the melt layer accompanied by its evaporation and further removal, the quantitative estimations of the vapor recoil pressure value have been obtained and the dependence of the pressure on the beam scanning velocity has been established. The energy balance equation for deep-penetration laser welding is presented that allows for partial evaporation and heat conduction loss.

Технология лазерной сварки с глубоким проплавлением (ЛСПП) получила широкое применение для обработки материалов в современной промышленности. Физические процессы, на которых основывается эта технология, представляют собой сложные явления взаимодействия сканирующего лазерного пучка с конденсированными средами. К важным вопросам такого взаимодействия относится механизм удаления расплава из зоны находящейся на пути сканирующего пучка. Общепринятым

является представление, что тонкие слои расплава удаляются давлением отдачи паров металла (“поршневой” механизм). Однако до сих пор отсутствует количественное описание зависимости давления отдачи паров от скорости сварки.

В данной работе для определения давления отдачи паров и его зависимости от скорости сварки используется свойство ЛСПП динамической согласованности перемещения лазерного пучка, нагрева с частичным испарением тонкого слоя расплава с его удаления давлением отдачи паров.

Динамическое согласование движения образца и удаления материала описывается уравнением сохранения его объёма или массы, которое можно записать в виде

$$v = \Delta_m 2v_m / \delta_m + v_v, \quad (1)$$

где v – скорость сварки, Δ_m – толщина слоя расплава, δ_m – ширина слоя расплава, v_m – скорость выноса расплава давлением отдачи паров, v_v – скорость фронта испарения. С учётом известной зависимости v_m от давления отдачи паров P_{om} , соотношений $P_{om} = \dot{m}_v v_d$, $\dot{m}_v = \rho v_d$, где v_d – скорость частиц вблизи поверхности расплава, ρ – плотность расплава, а также учитывая, что $v_d \approx v$, находится решение уравнения (1):

$$P_{om} \approx \rho \delta_m^2 / 32 \Delta_m^2 \cdot v^2, \quad (2)$$

Для δ_m и Δ_m следуют выражения из условия согласования движения образца и нагрева с частичным испарением:

$$\delta_m \approx \chi / \sqrt{2} v + 2r_0, \quad \Delta_m \approx (T_b / T_m - 1) \chi / v \quad (3)$$

где χ – коэффициент температуропроводности, r_0 – радиус лазерного пучка на поверхности образца, T_b, T_m – температуры испарения и плавления, соответственно. Согласно (2) P_{om} значительно падает с уменьшением скорости сварки, но оно не может быть меньше давления Лапласа, $r_m \approx \sqrt{\delta_m \Delta_m / \pi}$. Полученные результаты были использованы для составления уравнения энергетического баланса с учётом испарения материала. При этом теплопроводные потери учитывались в приближении, применённом в [1].

Список литературы

1. Semak V., Matsunawa // J.Phys.D: Appl.Phys. 1997. V.30. P.2541-2552.

Д.Р. ЯББАРОВА, Р. САЛИХОВ, Л.В. ХАБИБУЛЛИНА
*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

ИЗМЕРЕНИЕ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЗА УУКМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Одной из инновационных технологий обработки углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) является лазерная резка. Однако при этом наблюдаются повреждения краев кромок, образование трещин, мохрение углеродных волокон, запаивание их расплавленной эпоксидной смолой, иначе говоря, возникает зона термического влияния (ЗТВ), что приводит к ухудшению прочностных характеристик материала [1]. Поэтому так важно подобрать режим резки, обеспечивающий минимальное значение ЗТВ, и именно методы оптической микроскопии позволяют проводить быструю и точную оценку ширины и площади зоны термического влияния.

D.R. IABBAROVA, R. SALIKHOV, L.V. HABIBULLINA
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

INVESTIGATION OF HEAT-AFFECTED ZONE AFTER LASER CUTTING OF CCFC BY USING OF OPTICAL MICROSCOPY TECHNOLOGY

One of the innovative technologies for processing carbon-carbon composite materials (CCFC) is laser cutting. But it leads to the formation of heat-affected zone (HAZ), Therefore, it's so important to choose a cutting parameters to ensure a minimum HAZ value, and it is optical microscopy methods that allow to get a fast and accurate results of assessment of the width and area of the heat-affected zone.

В качестве материала для проведения исследования использовалась пластина углепластика толщиной в $5,32 \pm 0,05$ мм, изготовленная с помощью технологии RTM (Resin Transfer Moulding), метода инъекции ненасыщенной полиэфирной смолы в закрытую форму, осуществляемой под давлением, то есть переплетенное углеродное волокно, пропитанное эпоксидной смолой [2]. Газолазерная резка углепластика осуществлялась согласно действующему ГОСТу 5614-74 «Машины для термической резки металлов. Типы, основные параметры и размеры». Пластика материала УУКМ была разрезана на 6 экспериментальных образцов при постоянной

скорости реза в 90 мм/с, но с изменением мощности лазерного излучения с 3,0 до 5,0 кВт с шагом 0,4 кВт.

Образцы реза исследовали с помощью инвертированного оптического микроскопа Axio Observer на предмет выявления зоны термического влияния и определения ее численного значения. Образцы рассматривались при 50-кратном увеличении, в режиме темного поля. Этот метод контрастирования подходит для визуализации очень маленьких объектов, находящихся на грани оптического (трещины, дефекты на поверхности, мелкие частички), возможен как в проходящем, так и в отраженном свете и оптимален для контроля качества поверхностей. Для удобства анализа полученные результаты значений ЗТВ подготовленных образцов представлены в виде графика (рис. 1).

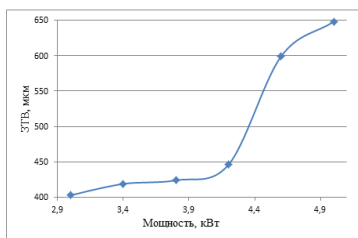


Рис. 1. График зависимости ЗТВ от мощности лазерного излучения

По полученному графику зависимости ширины ЗТВ от мощности лазерного излучения видно, что минимальное значение ЗТВ мы получили на образце реза при мощности излучения 3,0 кВт, однако, следует заметить, что такой мощности было не достаточно для резки пластинки УУКМ толщиной 5 мм при количестве проходов равном 20.

Материал начинает прорезаться полностью при заданных параметрах и мощности равной 3,8 кВт. Но при 4,2 кВт присутствует явный резкий рост зоны термического влияния так, что численные значения ЗТВ выходят за предельно допустимые согласно действующему ГОСТу 5614-74. Исходя из этого, можем сделать вывод, что целесообразно проводить лазерную резку при мощностях от 3,8 до 4,2 кВт, получая при этом рез хорошего качества.

Список литературы

1. Iabbarova D.R., Salikhov R.V., et al. // Modern problems of physics and technologies 2017. V.348. P.336-337.
2. Thomas G.P. // Resin Transfer Moulding (RTM) – Methods, Benefits and Applications // AZO Materials. 2013. P.725.
3. Belforte, Buschow K.H.J., et al. // Encyclopedia of Materials 2001. V.754. P.399-402.

С.В. МАКСИМОВА¹, В.В. КОВАЛЬ¹, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ¹,
Е.А. ШАХНО¹, М.О. КУЗИВАНОВ¹, Ю.С. МОРОЗОВ^{1,2}

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

ОКИСЛЕНИЕ ПЛЕНОК ТИТАНА ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В СХЕМЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Представлены результаты исследования возможностей повышения разрешающей способности термохимической записи на тонкой пленке титана в схеме интерференции лазерных пучков с использованием пикосекундных лазерных импульсов.

S.V. MAXIMOVA¹, V.V. KOVAL¹, R.A. ZAKOLDAEV¹,
E.A. SHAKHNO¹, M.O. KUZIVANOV¹, Yu.S. MOROZOV^{1,2}

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

OXIDATION OF TITANE FILMS BY PICOSECOND LASER PULSES IN MULTIBEAM INTERFERENCE SCHEME

The results of investigation of the possibilities of increasing the resolution of thermochemical recording on a thin titanium film in the interference scheme of laser beams using picosecond laser pulses are presented.

Методы формирования микро- и нано структур на поверхностях металлических плёнок находят свое применение в дифракционной оптике, микроэлектронике и других областях техники. Одним из наиболее перспективных направлений лазерной микро- и нано обработки является лазерная термохимическая запись. Материалом для реализации технологии чаще всего являются тонкие пленки хрома или титана [1]. Использование пленок хрома легко позволяет достигнуть достаточно высокой разрешающей способности, но требует дополнительной химической обработки (травления) после лазерного облучения. При лазерном облучении титановых пленок образуется оксид титана, который является оптически прозрачным. Таким образом, можно реализовать одноступенчатый процесс формирования контрастных структур [2].

Вместе с тем, на тонких титановых пленках требует больших значений экспозиции или применения большого количества импульсов для

достижения сквозного (или достаточно глубокого) окисления пленки, что необходимо для значительного изменения оптических характеристик.

В настоящей работе демонстрируются результаты возможности достижения высокой разрешающей способности лазерной термохимической записи на тонких пленках титана за счет применения пикосекундных лазерных импульсов и пространственно-модулированного излучения в схеме многолучевой интерференции лазерных пучков [3]. В результате эксперимента были получены периодические структуры с периодом от 1,5 до 3,5 мкм (рис. 1а), представляющие собой области локального окисления пленки, что было подтверждено исследованием полученных образцов методом рамановской спектроскопии (рис. 1б).

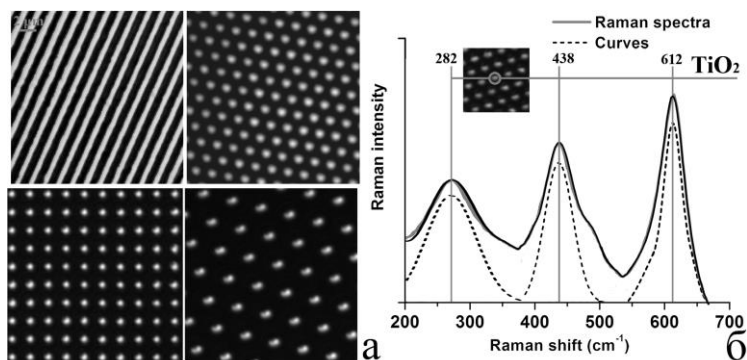


Рис. 1. Микрофотографии периодических структур (а) и результаты исследования рамановской спектроскопии (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-29-07227 офи_м.

Список литературы

1. Veiko V.P. Laser-Induced Local Oxidation of Thin Metal Films: Physical Fundamentals and Applications // Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies, Springer International Publishing. 2014. P.149-171
2. Veiko V.P, Shakhno E.A., Poleshchuk A.G., et al. // JLMN. 2008. V.3(3). P.201-205.
3. Gedvilas M., Voisiat B., Indrišiūnas S., et. al. // Thin Solid Films. V.634. P.134-140.

П.С. КОПЬЕВ, В.В. ЛЕНТОВСКИЙ, Д.Л. ФЁДОРОВ
*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Представлены результаты разработки конструкции наногетероструктуры, а также конструкции активного элемента и параметров резонатора мощного полупроводникового лазера с учетом заданных мощностных и пространственных характеристик лазерного излучения.

P.S. KOPIEV, V.V. LENTOVSKY, D.L. FEDOROV
*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

DEVELOPMENT OF DESIGN OF POWERFUL SEMICONDUCTOR LASERS FOR REMOTE POWER SUPPLY

The results of the design of the nanoheterostructure, as well as the design of the active element and the parameters of the resonator of a high-power semiconductor laser with allowance for the specified power and spatial characteristics of the laser radiation are presented.

Задачей проведенной большой расчетной и экспериментальной работы являлась разработка дизайна лазерной наногетероструктуры на подложке GaAs в системе твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs, обеспечивающей высокие мощностные, спектральные и пространственные характеристики лазерного излучения. Спектр лазерного излучения должен лежать в диапазоне 1060 ± 20 нм, ширина спектра по полувысоте не должна превышать 15 нм при всех режимах работы. Максимальная оптическая мощность в непрерывном режиме генерации должна превышать 10 Вт при температуре 25°C с апертуры 100 мкм, для облегчения ввода излучения в оптоволокно необходимо сузить диаграмму направленности излучения до 20° на полувысоте.

При разработке конструкции лазерных наногетероструктур основными задачами являлись:

- обеспечение работы лазера на нулевой поперечной моде электромагнитной волны;
- обеспечение минимальных внутренних оптических потерь в волноводе лазера;
- подавление выброса носителей заряда из активной области в волноводные слои;
- обеспечение минимального электрического сопротивления лазерной гетероструктуры;
- обеспечение устойчивости волноводных свойств гетероструктуры к флуктуациям составов и толщин, неизбежным при эпитаксиальном росте
- обеспечение технологичности конструкции.

В качестве базовой конструкции была выбрана конструкция лазерной гетероструктуры с эмиттерами из $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$, волноводом из GaAs, контактном слоем GaAs. Активная область представлена квантовыми ямами InGaAs толщиной 90 Å с составом, экспериментально подобранным для лазерной генерации на длине волны 1060 нм.

В результате получено обоснование состава и параметров макетных образцов перспективных полупроводниковых лазеров и приемных диодов, обеспечивающих достижение требуемых характеристик:

- произведен расчёт конструкции лазерной наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs и отработаны технологические режимы ее изготовления методом МОС-гидридной эпитаксии;

- произведен подбор технологических параметров процессов, обеспечивающих изготовления мощных полупроводниковых лазеров разработанного дизайна. Показаны основные этапы изготовления лазеров и результаты их тестирования.

Список литературы

1. Слипченко С.О., Подоскин А.А., Винокуров Д.А., Станкевич А.Л., Лешко А.Ю., Пихтин Н.А., Забродский В.В., Тарасов И.С. Анализ условий срыва генерации мод резонатора Фабри-Перо в полупроводниковых лазерах с полосковым контактом // ФТП. 2011. Т.45. В.10. С.1431-1438.

Х. БАЗЗАЛ, Е.С. ВОРОПАЙ,
А.П. ЗАЖОГИН, В.В. ЛЫЧКОВСКИЙ
Белорусский государственный университет, Минск

**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КАНАЛА НА ПРОЦЕССЫ
ОБРАЗОВАНИЯ AlN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
НА АЛЮМИНИЕВУЮ МИШЕНЬ СЕРИЯМИ
СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Исследованы процессы образования микроканалов при воздействии серий последовательных сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показана возможность увеличения как доли нанокластеров AlN, так и ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме в режимах абляции в зависимости от формы образующегося микроканала.

Kh. BAZZAL, E.S. VOROPAY,
A.P. ZAJOGIN, V.V. LICHKOVSKIY
Belarusian State University, Minsk

**INFLUENCE OF THE CHANNEL FORM ON THE AlN
FORMATION PROCESSES WHEN ALUMINUM TARGET
IS SUBJECTED TO A SERIES OF DOUBLE LASER PULSES**

The microchannel formation processes in the case when the surface of a target of aluminum alloy is subjected to the effect of a series of sequential double laser pulses in the air have been studied. The possibility to increase both the portion of AlN nanoclusters and of the differently charged aluminum ions in the surface laser plasma for various ablation modes has been demonstrated depending on the form of microchannel.

В настоящее время одним из материалов, перспективных и применяемых в микроэлектронике и оптоэлектронике в качестве широкозонного полупроводникового материала и диэлектрических теплоотводящих подложек, является нитрид алюминия (AlN) и керамические материалы на его основе.

Динамика процессов образования AlN исследовалась методом атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии на приборе LSS-1 при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав типа Д16Т от энергии (20-60 мДж) при временном

интервале между двоянными импульсами равном 10 мкс в атмосфере воздуха. Размер точки фокусировки ≈ 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм.

Динамика пробоя исследована по поступлению вещества в плазму при воздействии серий из 40 двоянных лазерного импульсов на точку. В качестве примера на рис. 1а приведены зависимости интенсивности полосы AlN (508 нм) от энергии импульсов, а рис. 1б соответственно форма микроканалов для разных энергий импульсов.

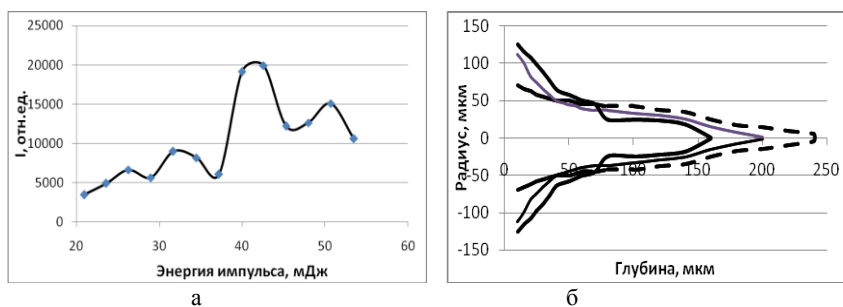


Рис. 1. Зависимость интенсивности полосы AlN (508 нм) от энергии импульсов (а) и формы канала от энергии импульсов (б) (--- 20 мДж; — 43 мДж; -·- 53 мДж)

Наблюдаемая нелинейная зависимость интенсивности полосы AlN от энергии может быть объяснена следующим образом. При импульсно-периодическом высокоинтенсивном лазерном воздействии в одну точку мишени, в результате процесса лазерной абляции, происходит вынос массы вещества мишени и образуется микроканал. При увеличении глубины кратера, формируемого при импульсно-периодическом лазерном воздействии на мишень, образующийся конический микроканал (см. рис. 1б) может служить аналогом сопла, проходя через которое, вещество мишени будет более эффективно кластеризоваться. Концентрация кластеров и их распределение за срезом сопла определяются геометрией сопла. Как правило, для формирования кластерного пучка, используются сопла с коническим профилем или сопло Лавала. Сопло с коническим профилем имеет преимущество: распределение плотности кластеров за его срезом является наиболее однородным. При расширении газа сквозь сопло, кластеризации подвергается не все атомы или молекулы газа, а только определенный их процент. Как видно из рис. 1б форма канала получаемого при энергии 43 мДж является более оптимальной для генерации нанокластеров AlN, чем форма получаемая при более высокой энергии импульсов равных 53 мДж.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, М.И. ЛИСОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ,
А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МАЛОИНДУКТИВНОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ С ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ

Представлены результаты исследования генерации ТГц излучения плазмой малоиндуктивного разряда в условиях микропинчевания. Инициация разряда производилась с помощью сфокусированного излучения импульсного Nd:YAG лазера (длительность импульса 10 нс, энергия импульса до 1 Дж). Энергия разряда составляла ~ 36 Дж. Предположена принципиальная роль микропинча для генерации мощного ТГц излучения. Рассчитана мощность разработанного ТГц источника и проведена экспериментальная оценка его спектра.

K.I. KOZLOVSKIY, M.I. LISOVSKY, A.P. MELEKHOV,
A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

TERAHERTZ RADIATION OF LOW-INDUCTANCE DISCHARGE IN VACUUM WITH LASER PLASMA INITIATION

The results of the study of THz radiation generation by plasma of the low-inductive vacuum spark are submitted. Initiation of the discharge was carried out using the focused radiation of a pulsed Nd:YAG laser. The principal role of micropinch for generation powerful THz radiation was assumed. The power of developed THz source was calculated and the experimental evaluation of its spectrum was carried out.

В современных условиях очень актуальны задачи обнаружения и идентификация взрывчатых веществ, взрывных устройств на их основе и поиск иных предметов, которые могут быть использованы в качестве оружия. ТГц излучение может использоваться (есть примеры использования) для поиска следов ВВ и осуществления досмотровых мероприятий в аэропортах, на почте и т.п. [1]. При этом очевиден интерес в создании мощных и при этом достаточно компактных, и относительно недорогих генераторов ТГц излучения.

Авторами рассматривается возможность использования компактного устройства на основе вакуумного диода с лазерной инициацией как источника широкополосного мощного ТГц излучения. На рис. 1 показана схема подобного источника.

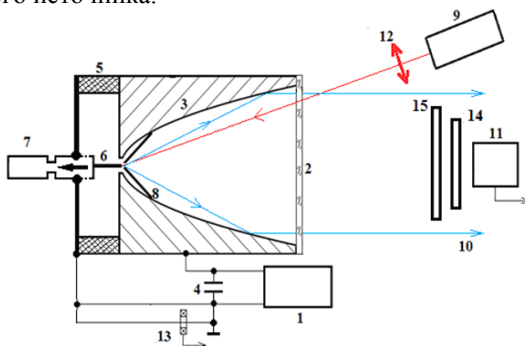


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник высокого напряжения; 2 – окно из плавленного кварца; 3 – параболическая камера; 4 – мало индуктивный конденсатор; 5 – изолятор; 6 – катод с каналом откачки; 7 – система откачки; 8 – молибденовые электроды; 9 – лазер; 10 – излучение ТГц параболоида; 11 – пироэлектрический детектор; 12 – оптическая линза; 13 – пояс Роговского; 14 – ТГц полосковый фильтр; 15 – фторопластовый фильтр

Установлено, что в разряде имеет место пинчевание плазмы [3] при каждом импульсе, что подтверждается полученными осциллограммами тока. Полученная зависимость мощности ТГц импульса от частоты излучения в диапазоне от 0,5 до 2,4 ТГц возрастает линейно. Это позволяет сделать предположение, что природа излучения преимущественно не тепловая.

Для оценки суммарной мощности импульса был произведен расчет на основании результатов диаграммы спектрального распределения мощностей, к тому же, был определен общий коэффициент поглощения ТГц излучения фильтрующей системой, который составил $k_1 = 0.85$ и учтено соотношение апертур выходного окна и приемного устройства, составившее $k_2 = 220$, таким образом, в разработанном ТГц источнике суммарное значение мощности импульса излучения в диапазоне частот 0,5 ÷ 2,4 ТГц составило $P \approx 22$ мВт.

Список литературы

1. <http://old.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2014-34-4/01.pdf>.
2. Короп Е.Д., Мейерович Б.Э., Сидельников Ю.В., Сухоруков С.Т. Микропинч в сильноточном диоде // УФН. 1979. Т.129. В.1. С.88.

К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРУЕМОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Изучение условий генерации терагерцового излучения плазмой, образуемой при лазерной инициации вакуумного разряда. Лазерное излучение фокусируется на острие конусообразного анода разрядной системы. Запасенная энергия разряда фиксирована $E_D \approx 17$ Дж. Величина энергии лазерного импульса варьируется в диапазоне $E_L = 8 \div 110$ мДж.

K.I. KOZLOVSKIY, A.P. MELEKHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTIMIZATION OF TERAHERTZ RADIATION GENERATION BY PLASMA OF LASER TRIGGERED VACUUM SPARK

The study of conditions of generation of terahertz radiation by plasma which is produced by laser initiated vacuum discharge. Laser radiation is focused near the tip of the conical anode of the discharge system (the discharge energy $E_D \approx 17$ J). The value of laser pulse energy varies in the range of $E_L = 8 \div 110$ mJ.

Цель работы состояла в определении влияния энергетических параметров лазерноиницированного вакуумного разряда на эффективность генерации плазмой терагерцового излучения (ТИ). На рис. 1 показан вид разрядной системы с лазерным иницированием.

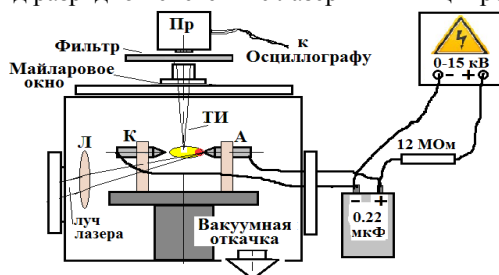


Рис. 1. Вид экспериментальной установки: 1) А, К - анод и катод разрядной системы; Л - линза с $f = 110$ мм; Пр - пьезоэлектрический приемник для регистрации ТИ; Фильтр - комбинация черной фотобумаги (0.5 мм) и пластины из тефлона (3 мм)

Величина энергии инициирующего разряд лазерного импульса $E_L = 8 \div 110$ мДж при длительности $\tau \leq 20$ нс. Высвобождаемая в разряде энергия $E_D \approx 17$ Дж при напряжении $U_{AK} = 12.5$ кВ. Для минимизации потерь ТИ выводится из вакуумной камеры через окно из майларовой пленки (50 мкм) и детектируется пироэлектрическим приемником с чувствительностью 5×10^4 В/Вт. Следует отметить, что для данной геометрии измерения ТИ важно экранировать пироэлектрический приемник от тормозного рентгеновского излучения с энергией кванта > 8 кэВ, которое обладает большей проникающей способностью чем мягкий рентген.

На рис. 2 приведены график зависимости мощности ТИ от величины энергии импульса лазера (А) и графики распределения импульсов ТИ по энергии в сериях из 12÷17 лазерно-инициированных разрядов (Б).

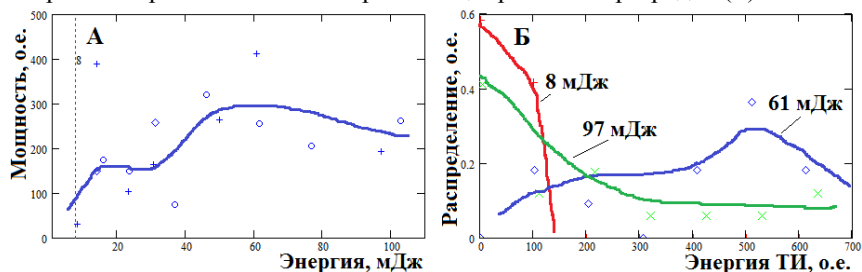


Рис. 2. Зависимость мощности ТИ от величины энергии импульса лазера (А) и распределение импульсов ТИ по энергии в серии из 12÷17 лазерноискровых разрядов (Б)

Эксперименты показали, что ТИ генерируется только при *анодном* лазерноинициированном вакуумном разряде [1]. При этом эффективность генерации ТИ сложным образом зависит от величины энергии лазерного импульса (рис. 2А). Также установлено, что энергия и стабильность ТИ, генерируемого плазмой разряда, в большой степени определяется состоянием поверхности электрода. Как видно из рис. 2Б даже при больших энергиях лазерного импульса (например, $E_L = 97$ мДж) наблюдается большой процент “пустых” разрядов, т.е. нет генерации ТИ. При малых энергиях лазерного импульса доля “пустых” разрядов достигает 60 %. Для понимания механизмов генерации ТИ плазмой вакуумной искры будет проведена серия экспериментов с параллельным контролем эмиссии мягкого рентгеновского излучения и ионов из плазмы низкоиндуктивной лазерноинициированной вакуумной искры.

Список литературы

1. Melekhov A.P., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V.737. P.012013.

В.В. КОВАЛЬ¹, В.С. РЫМКЕВИЧ¹, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ¹,
М.М. СЕРГЕЕВ¹, Ю.С. МОРОЗОВ^{1,2}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМЫ

Представлены результаты повышения разрешающей способности метода обработки стекла лазерно-индуцированной микроплазмой при формировании фазовых дифракционных элементов.

V.V. KOVAL¹, V.S. RYMKEVICH¹, R.A. ZAKOLDAEV¹,
M.M. SERGEEV¹, Yu.S. MOROZOV^{1,2}

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

INCREASING THE RESOLUTION OF LASER-INDUCED MICROPLASMA

We present the method for increasing the resolution of glass processing by laser-induced microplasma applied for phase diffraction elements recording using interference micromachining.

Современные лазерные технологии широко применяются при микроструктурировании поверхности стекла. Широкое распространение получили технологии структурирования оптических материалов, поверхность которых расположена в плотном контакте с подложкой, поглощающей излучение. Одним из таких методов является обработка стекла лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) [1]. Данный метод основан на сканировании сфокусированного пучка лазерного излучения в плоскости контакта стекла и прессованного графита, в результате чего происходит резкий нагрев пластины прессованного графита и формирование плазменного факела. Изменение рельефа тыльной стороны пластины плавленного кварца инициируется энергией плазменного факела, которой достаточно для испарения стекла.

Однако разрешающая способность в таких методах обычно ограничена размером сфокусированного лазерного пучка, и соответствует ~ 10 мкм. Поиск подходов повышения разрешающей способности является ключевым при создании фазовых оптических элементов ЛИМП. Одним из

таких может стать использование пространственно модулированного излучения – в схеме интерференции лазерных пучков [2].

В настоящей работе использовалась двухлучевая интерференционная схема на базе дифракционной решетки с периодом 50 мкм, изготовленной методом ЛИМП [1]. Пропускание схемы составило $\sim 20\%$ на длине волны $\lambda = 355$ нм. Конфокальная оптическая система (рис. 1а) с увеличением 1/20 позволяла формировать микрорельеф на поверхности плавленого кварца с периодом $p \sim 1.2$ мкм. На рис. 1б представлен результат такой микрообработки за 1 лазерный импульс длительностью $\tau = 25$ пс. При этом глубина сформированного рельефа зависит от плотности энергии лазерного излучения и может варьироваться в пределах 10 нм – 1 мкм. Например, пиковой плотности энергии ($\epsilon = 0.84$ Дж/см²) было достаточно для формирования периодического микрорельефа с глубиной ~ 120 нм.

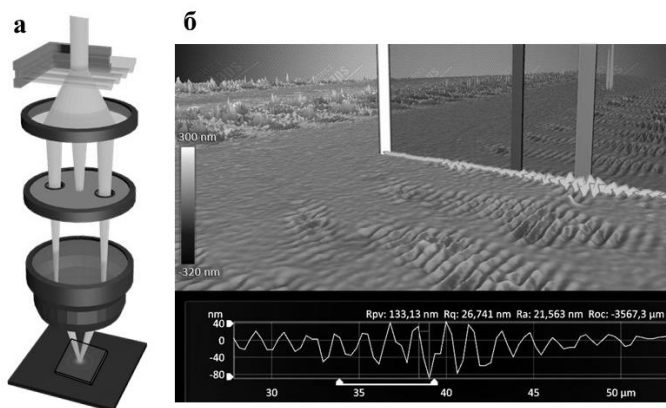


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), профиль поверхности стекла, полученный при помощи оптического профилометра ZeScore (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации, соглашение №14.587.21.0037 (RFMEFI58717X0037).

Список литературы

1. Kostyuk .K., Zakoldaev R.A., Koval V.V., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2017. V.92. P.63-69.
2. Gedvilas M., Voisiat B., Indrišiūnas S., et al. // Thin Solid Films. 2017. V.634. P.134-140.

Г.В. ШИЛОВА¹, А.А. СИРОТКИН^{1,2}, П.Г. ЗВЕРЕВ¹¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 563 нм

Представлен твердотельный лазер с длиной волны излучения 563 нм на основе кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с внутрирезонаторным удвоением частоты и последующим внутрирезонаторным ВКР-преобразованием.

G.V. SHILOVA¹, A.A. SIROTKIN^{1,2}, P.G. ZVEREV¹¹*Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow*²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

LASER WITH 563 nm WAVELENGTH GENERATION

All solid-state laser with 563 nm wavelength generation based on the crystal $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ with intracavity frequency doubling and intracavity SRS-conversion is presented.

В настоящее время компактные, дешевые лазерные источники желто-зеленого диапазона длин волн представляют интерес в различных областях биомедицины, офтальмологии, исследовании ДНК и т.п. Поглощение света в биологических тканях определяется его отдельными компонентами. Основные компоненты кожи, поглощающие свет – вода, меланин и гемоглобин. Выбирая те или иные длины волн излучения, мы можем воздействовать на отдельные компоненты кожи [1]. В кровеносных сосудах свет в основном поглощается гемоглобином и оксигемоглобином. Оксигемоглобин обладает двумя полосами поглощения в областях спектра с максимумами при длинах волн 577 и 542 нм [2]. Гемоглобин обладает широкой полосой поглощения с максимумом при длине волны 555 нм. Таким образом, используя излучение лазера в желто-зеленом диапазоне спектра вблизи пиков поглощения гемоглобина и оксигемоглобина, мы можем удалять аномальные расширенные сосуды кожи (телеангиэктазию, винные пятна), не повредив саму кожу. Для этих целей уже используют лазеры на красителях, на парах меди, вторая гармоника Nd^{3+} лазера [3]. Основными недостатками подобных установок являются большие массогабаритные параметры и высокое энергопотребление.

В данной работе представлен полностью твердотельный лазер, работающий на длине волны 563 нм. Схема экспериментальной установки

представлена на рис. 1. Кристалл ванадат иттрия $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ служил активным элементом. Внутррезонаторное удвоение частоты основного излучения реализовано в кристалле LBO, а затем в кристалле нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ происходило ВКР преобразование, в результате чего на выходе получено излучение с длиной волны 563 нм. Кристалл нитрата бария был выбран из-за своего высокого коэффициента усиления (47 см/ГВт для 532 нм) и достаточно большого стоковского сдвига (1047 см^{-1}) [4]. Для модуляции добротности использовался акустооптический затвор.

В результате на выходе получена ВКР генерация с длиной волны 563 нм. Так же на выходе было излучение с длинами волн 532 нм (вторая гармоника) и 598 нм (второй Стокс). Для измерений все эти длины волн разделялись дифракционной решеткой. На рис. 2 показана зависимость средней выходной мощности излучения от мощности накачки для каждой из компонент. Длительности импульсов излучения для данных длин волн составляли 25, 12 и 6 нс соответственно. Таким образом, для излучения с длиной волны 563 нм максимальная выходная мощность составила 100 мВт при мощности диодной накачки 5 Вт и частоте повторения импульсов 12,4 кГц. Пиковая мощность – 0,67 кВт.

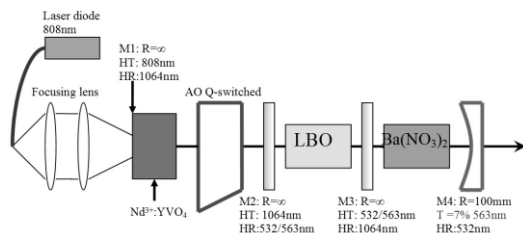


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

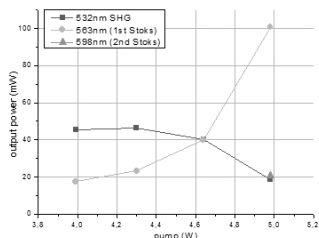


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности от мощности накачки

Список литературы

1. Anderson R.R., Parrish J.A. // *Lasers Surg Med.* 1981. V.1. P.263.
2. Alster T.S., Lupton J.R. // *Am J Clin Dermatol.* 2001. V.2(5). P.291-303.
3. McCoy S., Marschall H., Anderson P., et al. // *Dermatol Surg.* 1996. V.22. P.551.
4. Басиев Т.Т. // *Физика твердого тела.* 2005. Т.47 (8). С.1354-1358.

В.В. ВАСИЛЬЦОВ, М.Г. ГАЛУШКИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО
ТЕРАГЕРЦОВОГО ЛАЗЕРА С НАКАЧКОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ВОЛНОВОДНЫХ CO₂ ЛАЗЕРОВ**

Разработана расчётно-теоретическая модель THz-лазера на вращательных переходах в газах низкого давления с накачкой волноводным CO₂ лазерами с учётом взаимной связи активной среды, системы накачки и резонаторной системы. Рассмотрены условия согласования параметров этих систем и методы оптимизации параметров исследуемого THz-лазера.

V.V. VASILTSOV, M.G. GALUSHKIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura***MODELING OF PARAMETERS OF TERAHERTZ GAS LASER
PUMPED BY WAVEGUIDE CO₂ LASERS**

A design-theoretical model of a THz-laser on rotational transitions in low-pressure gases with pumping by waveguide CO₂ lasers has been developed. Allowance has been made for the interrelation between the active medium, pump system and resonator system. Consideration has been given to the conditions of matching of these systems parameters and to the methods of optimizing the parameters of the THz laser under study.

В разработках ТГц-лазеров на вращательных переходах в газах низкого давления используются последние достижения в области волноводных CO₂ лазеров. Для дальнейшего развития ТГц лазеров с накачкой волноводными CO₂ лазерами с целью повышения импульсной и средней мощности, а также качества излучения большое значение имеет создание расчётно-теоретических моделей, учитывающих взаимную связь активной среды, системы накачки и резонатора ТГц лазера.

Используя известную кинетику активной среды разреженного газа в рамках трёхуровневой системы, для коэффициента поглощения излучения накачки β и усиления ТГц излучения α получены следующие выражения

$$\beta = \beta_0 / (1 + 2J_p / J_{ps}) \quad , \quad \alpha = \sigma_T \tau_R \beta J_p / \hbar \omega_p (1 + 2J_T / J_{Ts}) ,$$

где β_0 – ненасыщенный коэффициент поглощения на единицу длины излучения накачки, J_p, J_{ps} – интенсивность излучения накачки и её насыщения, соответственно, σ_i – сечение лазерного перехода, τ_r – время релаксации вращательных уровней, $\hbar\omega_p$ – энергия кванта накачки, J_T, J_{TS} – интенсивность излучения генерации и её насыщения соответственно.

Рассмотрена аксиальная однопроходная оптическая схема накачки. Эффективность лазерной накачки достигает достаточно большой величины, когда выполняет соотношение $\bar{\beta} = 1/L_a$, где L_a – длина активной области. Величина β зависит от отстройки частоты излучения накачки ν_p от частоты ν_0 индуцированного ей колебательно-вращательного перехода, причём эта отстройка $\nu_p - \nu_0$ является важным параметром ТГц лазера, от которого сильно зависит коэффициент поглощения излучения накачки. Поэтому практически целесообразно проводить прямые измерения поглощения излучения накачки в газовой трубке при разных давлениях газа.

Проведены расчёты пороговых коэффициентов усиления для нескольких видов выходного зеркала резонатора. Наряду с селективными по частоте покрытиями рассматривались варианты с металлическими покрытиями, в которых оставлены отверстия для вывода генерируемого излучения в выходном зеркале и ввода сфокусированного пучка накачки во входном зеркале. Накачка сфокусированным пучком позволяет без использования селективных по частоте зеркал увеличить коэффициент отражения входного зеркала для терагерцового излучения, что понижает пороговый коэффициент усиления. Кроме того, повышается КПД накачки за счёт увеличения числа её проходов через активную среду. Разработанная методика расчётов параметров ТГц-лазера, позволяет осуществлять их выбор и оптимизацию. Результаты проведённых расчётно-теоретических исследований согласуются с экспериментальными данными, полученными в ИПЛИТ РАН [2].

Список литературы

1. Mueller E.R., Waldman J. // IEEE Trans. MTT. 1994. V.42(10). P.1891.
2. Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Панченко В.Я. // Лазеры в науке, технике, медицине. Сборник трудов. Москва. 2017. Т.28. С.8-13.

А.Н. КОЛЯДИН, М.С. АСТАПОВИЧ, А.В. ГЛАДЫШЕВ,
А.Ф. КОСОЛАПОВ, А.Д. ПРЯМИКОВ, Г.К. АЛАГАСHEB,
М.М. ХУДЯКОВ, М.Е. ЛИХАЧЕВ, И.А. БУФЕТОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИЗАЙНА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАМАНОВСКОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА 4.4 мкм НА ОСНОВЕ РЕВОЛЬВЕРНОГО КВАРЦЕВОГО СВЕТОВОДА, ЗАПОЛНЕННОГО ВОДОРОДОМ

Проведено численное моделирование оптических свойств как упрощённых моделей световодов с поллой сердцевинной, так и револьверных световодов с поллой сердцевинной в зависимости от различных параметров. На основании полученных результатов определена оптимальная конструкция револьверного волоконного световода, заполненного водородом, для реализации рамановского волоконного лазера, генерирующего на длине волны 4.4 мкм. Квантовая эффективность полученного лазера составила 36%, а средняя мощность 250 мВт.

A.N. KOLYADIN, M.S. ASTAPOVICH, A.V. GLADYSHEV,
A.F. KOSOLAPOV, A.D. PRYAMIKOV, G.K. ALAGASHEV,
M.M. KHUDYAKOV, M.E. LIKHACHEV, I.A. BUFETOV

Fiber Optic Research Center of the RAS, Moscow

EFFECTIVE RAMAN GENERATION AT 4.4 μM AND MEASUREMENT WITH ITS HELP THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE HOLLOW-CORE REVOLVER FIBER

Optical properties of simplified models of hollow-core fibers as well as of hollow-core revolver fibers are numerically investigated depending on various parameters. Based on the obtained results, the optimal design of the revolver fiber for Raman laser was determined. As a result, efficient ns-pulsed 4.42 μm Raman laser based on ¹H₂-filled revolver silica fiber is realized. Quantum efficiency as high as 36% and output average power as high as 250 mW are achieved.

Цель данной работы – определение оптимальных характеристик полого револьверного световода (РС) для создания на его основе рамановского волоконного лазера, осуществляющего преобразование длины волны излучения 1.56 мкм→4.4 мкм в водороде. Структура полого

револьверного световода характеризуется рядом параметров (диаметр сердцевинки, толщина стенок капилляров, составляющих отражающую оболочку, величина минимального зазора между капиллярами, количество капилляров в оболочке и тип стекла), что делает поиск оптимальной структуры длительной многофакторной задачей.

В связи с этим, первоначально был осуществлен расчет упрощённых структур полого световода, зависимости оптических потерь которых доведены до аналитических соотношений [1, 2]. Данные структуры представляют из себя отверстие в стекле (полый световод – ПС) [1] и стеклянный цилиндр с определённой толщиной стенки (трубчатый световод – ТС) [2]. Оценка свойств световода проводится с использованием соответствующего "параметра качества" P_F [3] (рис. 1).

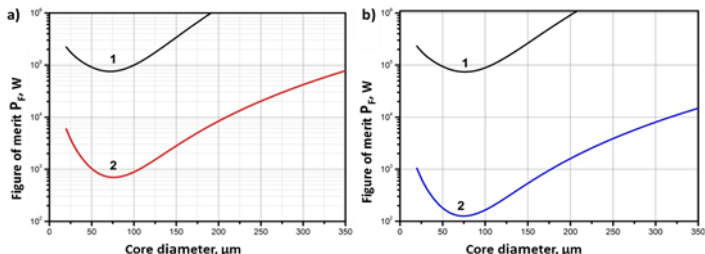


Рис. 1. Зависимость величины P_F для ПС (1) и ТС (2), заполненных H_2 при давлении 30 атм, от диаметра полой сердцевинки; зависимости для световодов из кварцевого (а) из халькогенидного (б) стекла; оптимальный диаметр сердцевинки световода определяется минимальным значением P_F и составляет ≈ 75 мкм

Точный численный расчет P_F для ПС также дал оптимальный диаметр сердцевинки 75 мкм. На основе результатов проведенных расчетов получен реальный световод со структурой, близкой к оптимальной. Собранный на его основе лазер генерирует 250 мВт на длине волны 4,4 мкм с квантовым КПД 36 % [4].

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект №16-19- 10513)

Список литературы

1. Marcatili E.A.J., et al. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers // Bell Syst. Tech. J. 1964. V.43. P.1783-1809.
2. Miyagi M. Bending Losses in hollow and dielectric tube leaky waveguides // Applied Optics, 1981. V.20(7). P.1221-1229.
3. Bufetov I.A., et al. A simple analytic model of a CW multicasade fibre Raman laser // Quantum Electron. 2000. V.30(10). P.873-877.
4. Gladyshev A.V., et al. 4.4-um Raman laser based on hollow-core silica fibre // Quantum Electron. 2017. V.47. P.491-494.

М.В. РОГОЖИН¹, В.Е. РОГАЛИН^{2,3}, М.И. КРЫМСКИЙ^{1,2}

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

²*Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Москва*
³*Тверской государственной университет*

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С ПОМОЩЬЮ КРИОАККУМУЛЯТОРА

Для многих электронных компонент характерно наличие очень жёстких требований к рабочей температуре при ограниченности массогабаритов системы. На примере работы лазерных диодов накачки твердотельного лазера, рассмотрена возможность использования для термостабилизации криоаккумулятора на фазовом переходе в условиях высокой (до +60 °С) температуры окружающей среды. Математическое моделирование позволило определить параметры криоаккумулятора, обеспечивающие термостабилизацию устройства при 18 ± 1 °С в течение ~ 2,5 часов.

M.V. ROGOZHIN¹, V.E. ROGALIN^{2,3}, M.I. KRYMSKY^{1,2}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

²*National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysica, Moscow*
³*Tver State University*

THERMAL CONTROL OF LASER DIODES BY USING PHASE CHANGE MATERIAL HEAT EXCHANGER

Many electronic components often work within very strict temperature and mass-size limitations. The feasibility of applying a phase change material heat exchanger for thermal control of laser diodes under conditions of high outer temperature (up to +60 °C) has been considered. Mathematical simulation let us define the parameters of the heat exchanger which can stabilize temperature of the laser installation at 18 ± 1 °C for ~ 2,5 hours.

Холодильники на фазовых переходах (криоаккумуляторы) известны давно [1], но в электронике пока не получили широкого распространения. Несмотря на ограниченное время работы, они, помимо компактности, обладают рядом преимуществ - устойчивостью к ЭМИ, нулевым энергопотреблением, надёжностью в работе, отсутствием вибраций и шума.

Рассмотрено устройство (рис. 1), состоящее из медного тепловыделяющего диска (1) диаметра $D = 20$ см и толщины ~ 1 см, на

котором расположена матрица лазерных диодов. Далее - слои элементов Пельтье (2) и радиатора - криоаккумулятора (3), являющегося цилиндром из пористого металла диаметра D и высоты H . Поры заполнены веществом, претерпевающим фазовый переход первого рода при поглощения тепла. Это - глицерин с температурой плавления $T_{\phi} = 18^{\circ}\text{C}$, $\lambda_{\phi} = 20,1 \times 10^4$ Дж/кг.

Тепловыделение $q(t)$ ступенчатое. В пассивном режиме длительностью $t_1 = 10$ мин в диске выделяется мощность $P_1 = 25$ Вт, в последующем за ним активном режиме $t_2 = 150$ с в диске выделяется дополнительная мощность $P_2 = 300$ Вт. В дальнейшем зависимость $q(t)$ циклически повторяется. Далее, математически решена задача обеспечения термостабилизации тепловыделяющего диска в диапазоне температур $\Delta T \leq 1^{\circ}\text{C}$ в заданных условиях с максимальным временем работы $t_{\max} \geq 2$ часа при минимально возможных массогабаритах криоаккумулятора (рис. 2).

Предложенная конструкция криоаккумулятора плавления, изготовленного из пористого алюминия с активным веществом – глицерином, позволяет обеспечить эффективную термостабилизацию лазерной установки с рассмотренным режимом тепловыделения в диапазоне температур $T = (18 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ в течение $\sim 2,5$ часов. Высота холодильника при этом составляет $H = 24$ см, масса $m = 12,8$ кг.

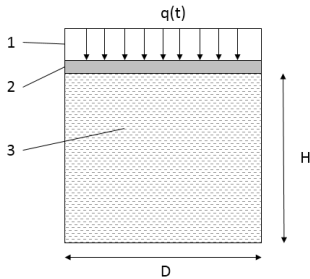


Рис. 2. Принципиальная схема установки

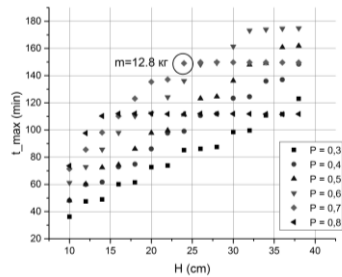


Рис. 3. Максимальное время функционирования системы при различных конфигурациях холодильника

Список литературы

1. Лесюк Е.А. Исследование процессов в аккумуляторах холода с теплопроводящей насадкой и разработка расчетных методов их оптимизации. Дис. ... канд. тех. наук. М., 1999.

Р.К. МОЖАЕВ¹, М.Е. ЧЕРНЯК^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ И ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ФОТОДИОДОВ В СОСТАВЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ МОДУЛЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ГАММА-КВАНТОВ И НЕЙТРОНОВ

Приведены результаты измерений оптических и электрических параметров лазерных диодов на квантовых ямах и гетероэпитаксиальных фотодиодов при радиационном воздействии гамма-квантами и нейтронами.

R.K. MOZHAEV¹, M.E. CHERNIAK^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Specialized electronic systems, Moscow

STUDY OF QUANTUM WELL LASER DIODE'S AND HETEROSTRUCTURAL P-I-N PHOTODIODE'S IN FIBER-OPTIC MODULES RADIATION HARDNESS TO GAMMA-RAY AND NEUTRON IRRADIATION

The paper presents the measurements results of optical and electrical parameters of quantum well laser diodes and heteroepitaxial photodiodes under gamma-ray and neutron irradiation.

Лазерные диоды и фотодиоды, широко используются в качестве управляемых источников оптического излучения в волоконно-оптических системах. Эти изделия являются перспективной альтернативой классическим линиям связи на борту спутников и нуждаются в оценке радиационной стойкости.

Для этих целей были проведены испытания лазерных диодов излучателей и фотодиодов приемников на стойкость к эффектам поглощенной дозы от гамма-излучения и стойкость к структурным повреждениям от воздействия нейтронов. Данные эффекты являются наиболее характерными при функционировании электронных устройств на борту спутников вблизи радиационных поясов Земли [1].

При облучении испытуемых образцов использовался ускоритель электронов У31/33 в режиме тормозного излучения. Суммарный уровень накопленной дозы составил порядка 0,5 Мрад. На рис. 1 приведены характеристики образцов излучателей и приемников.

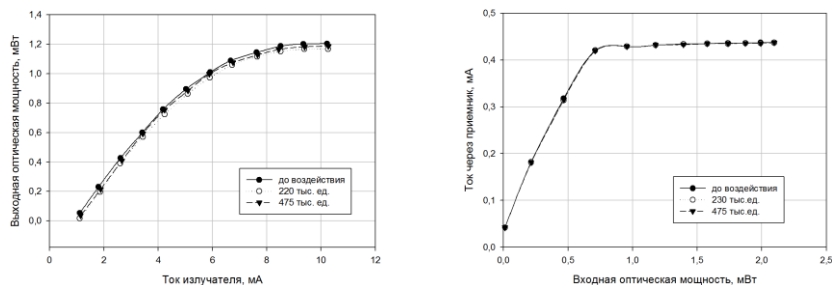


Рис. 1. Экспериментальные зависимости для характеристик излучателей и приемников при гамма-облучении от уровня накопленной дозы

Для симуляции воздействия протонов радиационных поясов, проводилось облучение образцов на импульсном реакторе быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ. Результаты до и после воздействия приведены на рис. 2. Достигнутый уровень составил 10^{14} н/см².

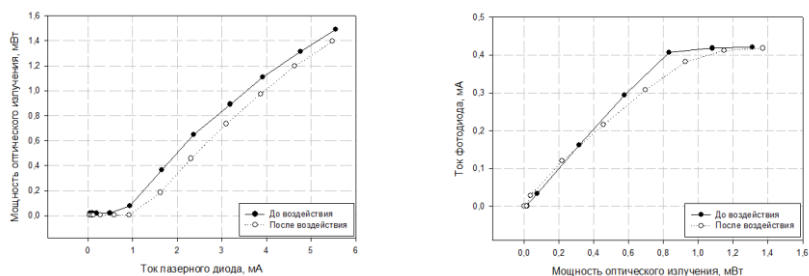


Рис. 2. Экспериментальные зависимости для характеристик излучателей и приемников при гамма-облучении от уровня накопленной дозы

Замечено, что после облучения параметрических и функциональных отказов устройств не наблюдалось.

Список литературы

1. Phifer C.C. Effects of Radiation on Laser diodes. Laser, Optics, Plasma Sciences, Vision Science and Remote Sensing department of Sandia National Laboratories, 2004.

А.Н. МАЛОВ, С.А. НЕБОГИН, А.А. ВАЙЧАС¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет

¹*Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации*

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛАНАРНУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ БИООРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Представлены результаты кристаллографической регистрации воздействия лазерного излучения на биоорганические растворы. Анализ полученных кристаллограмм проведен с помощью зондового микроскопа.

A.N. MALOV, S.A. NEBOGIN, A.A. VAYCHAS¹

Irkutsk National Research Technical University

²*Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation*

LASER RADIATION INFLUENCE ON PLANAR BIOORGANIC SOLUTION CRYSTALLIZATION

Results of experimental studying of laser radiation influence on organic solutions under their crystallograms analysis with the help a scanning probe microscope with nanometer resolution.

В [1] высказывалось предположение о возможном влиянии лазерного излучения на кристаллизацию в объеме белой желчи. В объеме натуральной желчи из-за наличия пигмента, поглощающего лазерное излучение, подобного эффекта не наблюдалось. Поэтому в настоящей работе исследовалось влияние лазерного излучения на процессы кристаллизации в тонком слое пигментированной желчи. Чтобы исключить влияние на морфологию кристаллограмм отсутствия или наличия дестабилизации коллоидной структуры желчи, ее стадии, давности появления симптомов билиарной патологии [2] объектом исследования была выбрана желчь медицинская консервированная. В эксперименте 20% водный раствор медицинской желчи в течение 2 минут облучали излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 650$ нм, плотность мощности около 250 мВт/см²). Далее каплю исследуемой жидкости (контрольные и облученные лазером образцы) объемом 0,1 мл наносили на обезжиренную стеклянную подложку и высушивали при комнатной температуре 20-25 °С и относительной влажности воздуха 65-70 % в течение 18-24 часов. Сухие пленки исследовались в сканирующем

зондовом микроскопе NT-MDT solver контактным методом. Область сканирования 50x50 мкм.

Установлено, что структуры кристаллограммы необлученного раствора расположены гораздо плотнее, в отличие от кристаллограммы облученного раствора, хотя средний поперечный размер структур в обоих случаях не сильно отличается и равен приблизительно 1-2 мкм (рис. 1, 2).

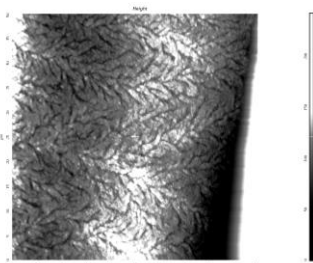


Рис. 1. Двумерное изображение поверхности кристаллограммы необлученного раствора

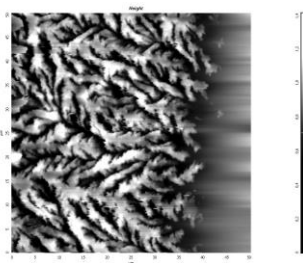


Рис. 2. Двумерное изображение поверхности кристаллограммы облученного раствора

Возможный механизм влияния лазерного излучения на процессы кристаллизации в объеме и тонком слое органических растворов, заключается в разбиении в растворе крупных ассоциатов молекул вещества, которые должны стать центрами зародышеобразования, на более мелкие объединения [1, 3]. Результаты, полученные в настоящей работе, обусловлены значительной плотностью мощности излучения, которым воздействовали на раствор по сравнению с таковой в [1, 3], что приводило к увеличению температуры раствора при «холодной» подложке. Поэтому происходило усиление процесса кристаллообразования в отличие от кристаллизации необлученного раствора. Поскольку кристаллизация происходила в тонком слое, то вкпе с перепадом температур это дополнительно ее ускоряло, что и приводило к различию в плотности расположения кристаллографических структур в случае облученного и необлученного растворов.

Список литературы

1. Malov A.N., Vaychas A.A., Novikova E.N. // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. 2017. V.3. №2.
2. Вахрушев Я.М., Хохлачева Н.А. // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2011. №4. С.26-30.
3. Malov A.N., Seteikin A.Yu., Neupokoeva A.V., et al. // Optik. 2013. V.124. P.6034-6041.

А.А. КОВАЛЕНКО, Н.Н. ЕВТИХИЕВ², Г.Б. АЛЬТШУЛЕР³,
В.А. ВИННИЧЕНКО

НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США*

СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 442 нм С Ho:YAG (2100 нм), ВОЛОКОННЫМ Tm (1940 нм) И KTP (532 нм) ЛАЗЕРАМИ ДЛЯ АБЛЯЦИИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ

Приведены результаты экспериментов для лазера с длиной волны 450 нм с Ho:YAG, волоконным Tm-лазером (работающий в трех режимах: непрерывном, импульсном и супер-импульсном) и KTP по оценке эффективности абляции для следующих параметров: глубина зоны абляции, скорость vaporизации (зона vaporизации \times скорость резки), зона коагуляции и уровень карбонизации. Для KTP лазера были использованы уже опубликованные данные.

A.A. KOVALENKO, N.N. EVTICHIEV², G.B. ALTSHULER³,
V.A. VINNICHENKO

YAROSLAVSKY², A.A. KOVALENKO

IRE-Polus Corporation, Fryazino

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*IPG Medical, Marlborough, USA*

COMPARISON OF A NOVEL 450-nm LASER WITH Ho:YAG (2100 nm), Tm-FIBER (1940 nm), AND KTP (532 nm) LASERS FOR SOFT-TISSUE ABLATION

The results of experiments for a laser with a wavelength of 450 nm, Ho: YAG and Tm fiber lasers (3 working modes - continuous, pulsed and super-pulsed) are presented for ablation quality for the following parameters: depth of ablation zone, mm, vaporization rate (zone vaporization \times cutting speed), mm³ / s, coagulation zone (mm²) and level of carbonation). For the KTP laser, already published data was used.

Лазерная терапия стала стандартным методом лечения для абляции доброкачественной гиперплазии предстательной железы (ДГПЖ) – нераковое увеличение простаты. Во время лазерной хирургии световая энергия разрушает или удаляет увеличенную ткань с помощью двух методов: vaporизации и энуклеации. KTP (длина волны 532 нм) и Ho: YAG (длина волны 2100 нм) – стандартные системы, которые применяются в

этих двух подходах, соответственно. В последние годы также была доказана эффективность использования волоконного Тм-лазера (длина волны 1940 нм) при ДГПЖ, и популярность этой системы быстро возрастает [1].

Вода и гемоглобин являются одними из основных хромофоров биологической ткани. Кроме того, что предстательная железа содержит воду, сама процедура энуклеации или вапоризации также происходит в воде. Поэтому использование Ho: YAG или волоконного Тм-лазеров, излучение которых поглощается главным образом в воде (причем, длина волны волоконного Тм-лазера находится на пике поглощения воды), является эффективными [2]. Однако ткань предстательной железы является также кровенаполненным органом. Поэтому, использование лазерного излучения на длине волны, которая поглощается гемоглобином, также эффективно, как видно в случае с КТР-лазером [3]. Поэтому была разработана новая лазерная диодная система мощностью 100 Вт, 442 нм, причем коэффициент поглощения крови для диапазона длин волн от 400 до 500 нм выше более чем в 3 раза, чем для зеленых длин волн [4].

В настоящем исследовании был впервые проведен сравнительный анализ четырех систем по оценке эффективности абляции мягких тканей по следующим параметрам: глубина зоны абляции, скорость вапоризации (зона вапоризации \times скорость резки), зона коагуляции и уровень карбонизации. Для этого была сконструирована специализированная лабораторная установка по оценке данных параметров.

Экспериментально было продемонстрировано:

- глубина зоны абляции и скорость вапоризации для лазера с длиной волны 442 нм больше по сравнению с волоконным Тм (в непрерывном и суперимпульсном режимах) и Ho: YAG лазерами соответственно в 1,2 и 2,4 раза;

- самая большая зона коагуляции была зафиксирована для волоконного Тм-лазера, работающего в непрерывном режиме (что важно для хорошего гемостаза), самая маленькая же – у Ho: YAG;

- воздействие на биологическую ткань лазера с длиной волны 442 нм подобно КТР лазеру (согласно косвенному сравнению с литературными данными).

Список литературы

1. Altshuler G. // Eur Uro Suppl. 2017. V.16.
2. Boulnois J. // Laser in Medical Science. 1986. V.1.
3. Kang H., Kim J., Peng Y. // Lasers in Surgery and Medicine. 2010. V.42. P.237-244.
4. Yaroslavsky A., Yaroslavsky I., Goldbach T., Schwarzmaier H. // Proc. SPIE. 1996. V.2678. P.314-324.

Д.С. ДУДОВА¹, К.Н. БАРДАКОВА^{1,2}, Н.В. МИНАЕВ¹,
П.С. ТИМАСHEB^{1,2}

¹*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

²*Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова*

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТРИКСОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНЫ

В работе представлены результаты экспериментов по формированию матриц на основе биорезорбируемых полимеров и материалов на основе коллагена с целью дальнейшего модифицирования для направленной дифференциации клеток, культивируемых на их поверхности. Показана возможность формирования микронных структур на основе полилактидов с помощью системы двухфотонной микростереолитографии и паттернов из фоточувствительного разветвленного полилактида на поверхности коллагеновых материалов с помощью классической стереолитографии.

D.S. DUDOVA¹, K.N. BARDAKOVA^{1,2}, N.V. MINAEV¹,
P.S. TIMASHEV^{1,2}

¹*Institute of Photonic Technologies – branch of FSRC «Crystallography and Photonics»
of the RAS, Troitsk*

²*Sechenov First Moscow State Medical University*

LASER INDUCED FORMATION OF FUNCTIONAL MATRICES FOR BIOMEDICINE

The paper presents the results of experiments on the formation of matrices based on bioresorbable polymers and collagen-based materials, which will be used for directional differentiation of cells cultured on their surface after additional modification. The possibility of formation of micron structures based on polylactides using a two-photon microstereolithography system and patterns based on photosensitive branched polylactide on collagen film surface using classical stereolithography method is shown.

Аддитивные технологии широко используются в различных областях повседневной жизни и науки, особое внимание при этом уделяют использованию этих технологий в медицине. Очень важным вопросом остается выбор технологии и источника лазерного излучения для формирования элементов с высокой точностью и заданными параметрами. В работе используются перспективные методы формирования различных функциональных матриц, такие как метод классической

стереолитографии и метод двухфотонной микростереолитографии. Особое внимание при формировании двух и трехмерных объектов с помощью лазерных технологий, предназначенных для биомедицины, уделяют материалам, так как они должны обладать следующими свойствами: биосовместимостью, нетоксичностью, биodeградацией и другими. Поэтому в нашей работе выбраны биоразлагаемые полилактиды [1] и губки и пленки из коллагена крупного рогатого скота [2].

Для задач направленной дифференциации клеток требуется формирование полимерных пластин с заданными пространственными характеристиками и высоким разрешением, а именно пластины с рабочими областями диаметром 400 мкм и различной топологией поверхности. При получении этих матриц была использована система двухфотонной микростереолитографии, состоящая из иттербиевого твердотельного фемтосекундного лазера (Avesta, Россия) с генератором второй гармоники (525 нм), двухзеркального гальваносканера (LScan), различных объективов в качестве фокусирующих систем, которые позволяли достичь диаметра фокальной перетяжки менее 1 мкм.

В результате экспериментов были получены массивы трехмерных объектов с различной поверхностной структурой. Формирование развитой поверхностной структуры является необходимым условием для успешной дифференциации клеток.

Второй задачей работы являлась формирование паттернов различной геометрии на поверхности коллагеновых пленок и губок для улучшения их механических свойств. В этих экспериментах использовалась схема классической стереолитографии. В качестве источника лазерного излучения использовался УФ лазерный диод с длиной волны 405 нм, сканирующая система была основана на однозеркальном гальваносканере (LScan), излучение фокусировалось с помощью F-theta объектива с фокусным расстоянием 160 мм, который позволял достичь пятна фокусировки на образце диаметром 100 мкм.

Эксперименты показали, что УФ лазерное армирование с помощью формирования паттернов на поверхности коллагеновых материалов в объеме материала является перспективным методом для улучшения механических свойств коллагеновых материалов. Лазерное армирование в присутствии биосовместимой фоточувствительной композиции приводит к повышению механических свойств коллагеновых пленок в 6 раз.

Список литературы

1. Timashev P., et al. // Nanomedicine. 2016. V.11. №9. P.1041-1053.
2. Шехтер А.Б. и др. // Архив патологии. 2015. Т.77. №6. С.29-38.

А.В. НЕУПОКОЕВА, А.Н. МАЛОВ¹, С.А. НЕБОГИН¹

Иркутский государственный медицинский университет

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ БЕЛКОВЫХ РАСТВОРОВ МЕТОДОМ АНАЛИЗА КРИСТАЛЛОГРАММ

Рассматривается анализ кристаллограмм с помощью зондового микроскопа как метод выявления изменений в структуре жидкости под действием лазерного излучения. Приводятся экспериментальные данные по влиянию лазерного излучения с различными длинами волн на структуру белкового раствора.

A. V. NEUPOKOEVA, A. N. MALOV¹, S. A. NEBOGIN¹

Irkutsk State Medical University

¹*Irkutsk National Research Technical University*

DETERMINATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF WORKING LIQUIDS BY DIGITAL SPECKLE IMAGES PARAMETERS ANALYSIS

An analysis of crystallogram by using a probe microscope is considered as a method to identify changes in the structure of the liquid under the action of laser radiation. Experimental data on the influence of laser radiation with different wavelengths on the structure of the protein solution are presented.

В настоящее время актуальной является задача мониторинга структурных изменений в жидких средах как с целью диагностики различных заболеваний, так для изучения изменений, возникающих под действием лазерного воздействия или других физических факторов [1-3]. Одним из самых простых и при этом наглядных методов мониторинга структурных изменений в жидких средах является получение кристаллограмм, размер сегмента которых непосредственно связан с характерным размером неоднородностей в биожидкостях.

Цель настоящей работы – мониторинг изменений, возникающих в структуре белка при воздействии лазерным излучением различных длин волн, путем анализа кристаллограмм с помощью зондового микроскопа.

В качестве объекта исследования был выбран раствор «гриппферон», основным компонентом которого является интерферон альфа-2b – фактор белковой природы, который обеспечивает противовирусный иммунитет.

Раствор грипиферона в кювете подвергался воздействию лазерного излучения (длины волн 655 и 530 нм, интенсивность около 80 мВт/см²) в течение 1, 2, 5, 10 минут. Затем облученные образцы и необлученный раствор поливались на одинаковые стеклянные подложки и выдерживались при комнатной температуре для получения кристаллограмм. Кристаллограммы исследовались с помощью зондового микроскопа и строилась 3D модель рельефа кристаллограммы (рис 1).

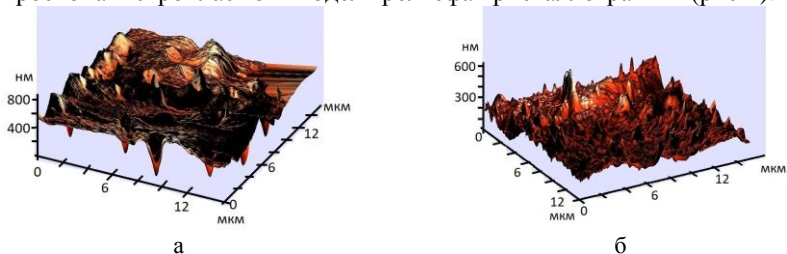


Рис. 1. 3D модель рельефа кристаллограммы: до воздействия (а), после 10 минут воздействия (б)

При воздействии лазерным излучением с длиной волны 530 нм уменьшение характерного размера структуры наблюдалось уже через 5 минут воздействия, а после 10 минут воздействия – размер неоднородности уменьшался в среднем вдвое. При воздействии лазерным излучением с длиной волны 650 нм изменения характерного размера кристаллограммы также начинались после 5 минут воздействия, но изменения относительно исходного размера были меньше.

Таким образом, экспериментально показано, что под воздействием лазерного излучения изменяется структура белкового раствора, что отражается на характерном размере сегментов кристаллограммы. Эти изменения могут быть не только качественно зарегистрированы, но и определены количественно с помощью 3D моделей поверхности кристаллограммы, построенных зондовым микроскопом. Лазерное излучение зеленого диапазона дает более значимое изменение структуры, по сравнению с лазерным излучением красной области спектра.

Список литературы

1. Шабалин В.Н., Шатохина С.Н. Морфологии биологических жидкостей человека. М.: Хризостом, 2001.
2. Малов А.Н., Мусатова Е.С., Сетейкин А.Ю. Кристаллографическая регистрация результатов лазерной нанокристаллизации биоорганических жидкостей. // V Троицкая конф. «Медицинская физика и инновации в медицине»: сб. материалов. Троицк, 2012. Т.2. С.80-82.
3. Paringer R.A., Kupriyanov A.V., Pyasova N.Y. Dendritic crystallogram images classification // Journal of Biomedical Photonics and Engineering. 2015. №2. P.135-138.

П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.В. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА¹,
О.О. ФРОЛОВ, Н.К. КИЙКО, А.Ю. КУЛАБУХОВА

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

¹*Самарский государственный медицинский университет*

ОПТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИМПЛАНТАТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОЙ МОЗГОВОЙ ОБОЛОЧКИ

Представлены результаты сравнительной спектральной оценки компонентного состава поверхностей образцов твердой мозговой оболочки (ТМО) изготовленных по технологии «Лиопласт», применяемой в клинике в области атрофических процессов при множественных рецессиях десны, с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). На основе проведенного анализа были введены оптические коэффициенты, отражающие изменение относительной концентрации компонентов биоматериала, которые определяют качество имплантов. Установлено, что спектроскопия комбинационного рассеяния может быть использована для оценки изменения состава имплантатов на основе твердой мозговой оболочки в процессе их изготовления.

P.E. TIMCHENKO, E.V. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA¹,
O.O. FROLOV, N.K. KIYKO, A.Yu. KULABUKHOVA

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev

¹*Samara State Medical University*

OPTICAL EVALUATION OF IMPLANTS BASED ON THE DURA MATER

In this paper we present results of the comparative evaluation of the structural properties of the dura mater specimens (DM), manufactured using the "Lioplast" technology, used in the clinic in the field of atrophic processes in multiple gums recessions, using the Raman spectroscopy (RS) method. Based on the analysis, optical coefficients reflecting changes in the relative concentration of biomaterial were introduced, which define the quality of implants. It is found that Raman spectroscopy can be used to assess changes in composition of bioimplant based on dura mater, during the manufacturing process according to different methods.

В настоящее время увеличивается количество пациентов с жалобами на повышенную чувствительность зубов и корней. Частой причиной этого является рецессия десны, которая ухудшает внешний вид зубов, десны и эстетики улыбки [1, 2]. Распространенность рецессии десны, по данным

зарубежных авторов, увеличивается с возрастом с 38 % в возрастной группе 30-39 лет до 90 % в возрастной группе 80-90 лет.

В клинической практике хирурга-стоматолога для тканевой регенерации с использованием слизистой-надкостничного лоскута часто используют биологические имплантаты консервированной аллогенной твердой мозговой оболочки (ТМО). [3]. Применение любого изделия медицинского назначения, особенно предназначенного для имплантации, невозможно без доклинической оценки его биологического действия [4].

Благодаря оперативному и неинвазивному типу исследования метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) является одним из возможных методов оценки качества имплантов из твердой мозговой оболочки.

Объектами исследования являлись образцы твёрдой мозговой оболочки размером 10*10 мм, изготовленные по технологии «Лиопласт»® (ТУ-9398-001-01963143-2004).

Для изучения спектральных характеристик биоимплантатов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый высокоразрешающим цифровым спектрометром Andor Shamrock sr-303i со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, обеспечивающей спектральное разрешение 0,15 нм, и рамановским пробником RPB785, совмещенным с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны 785 нм).

В результате проведенной работы установлены особенности спектров комбинационного рассеяния для образцов аллогенной твердой мозговой оболочки, изготовленных по различным методикам.

Введены коэффициенты и проведён расширенный спектральный анализ, который показал, что при обработке сохраняются основные компоненты матрикса, что обеспечивает возможность оптимального клинического эффекта при лечении множественных рецессий десны.

Список литературы

1. Ронь Г.И., Смирнова С.С. Частота, структура и причина развития рецессий десны у жителей города Екатеринбурга // Проблемы стоматологии. 2010. №2. С.22-25.
2. Мусиенко А.И., Попов А.К. Рецессия десны и метод её устранения // Институт стоматологии. 2006. №1. С.1-2.
3. Moawia M.K., Robert E.C. The etiology and prevalence of gingival // Of the American Dental Association. 2003. №134. С. 220-225.
4. Перова Н.В. Дифференцированный подход к доклинической оценке биологической безопасности имплантатов. ГУ научно-исследовательский институт трансплантологии и искусственных органов МЗ РФ. Центр по исследованию биоматериалов, 2004.

Л.А. КОКОРИНА, А.Н. МАЛОВ¹,
А.В. НЕУПОКОЕВА, М.Н. ТРЕТЬЯКОВА²

Иркутский государственный медицинский университет

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

²*Иркутский государственный университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ АКТИВАЦИИ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ РОСТА МИКРООРГАНИЗМОВ

Рассмотрены процессы фотомодификации растворов питательных сред при действии лазерного излучения. Экспериментально показано, что на облученной среде может происходить как уменьшение скорости роста микробов, так и увеличение, в зависимости от используемой тест-культуры.

L.A. KOKORINA, A.N. MALOV¹,
A.V. NEUPOKOEVA, M.N. TRETYAKOVA²

Irkutsk State Medical University

¹*Irkutsk National Research Technical University*

²*Irkutsk State University*

STUDY OF THE NUTRIENT ENVIRONMENT LASER ACTIVATION EFFECT ON THE MICROBIAL GROWTH DYNAMICS

The processes of nutrient medium solutions modification under the laser radiation action are considered. It is experimentally shown that in the irradiated environment may occur either a microbes growth rate decreasing or increasing, it depend on the test culture.

Изучение влияния физических факторов на развитие популяций микроорганизмов может позволить повысить или понизить интенсивность микробиологических процессов, что дает возможность управлять развитием микробных популяций в интересах человека, например, использовать это при лечении инфекционных заболеваний человека. При этом предметом изучения микробиологов являются организмы различных типов, отличающихся как строением, так и особенностями питания.

Целью настоящей работы являлось определение влияния лазерного облучения питательных сред на динамику роста различных микроорганизмов.

Известно, что в качестве питательной среды для культивации микроорганизмов часто используют белковые растворы [1]. При этом белковые молекулы формируют посредством объединения молекул кластеры (ассоциаты) за счет сил электростатического взаимодействия [2]. С другой стороны, экспериментально доказано [3], что под действием лазерного излучения кластеры способны распадаться на более мелкие образования, создавая гомогенную смесь с меньшим числом крупных неоднородностей.

Опытным путем проводилась оценка влияния лазерного облучения (мощность около 100 мВт, длина волны – 532 нм, суммарная энергия облучения составляла около 5 Дж/г) питательной среды (мясопептонный агар) на динамику роста бактерий с контролем по числу колоний микроорганизмов, выращенных в питательной среде без лазерного облучения. В качестве тестовой культуры использованы штаммы кишечной палочки, грибы рода *Candida* и сенная палочка *Bacillus subtilis*. Оценка роста микробов осуществлялась каждые 12 часов подсчетом колоний, начиная с нулевой точки.

Изучение динамики сенной палочки показало, что облучение питательной среды в течение 120 с приводит к снижению темпов роста в среднем на 30 %, но с течением времени разница в скорости роста уменьшается с 50 % до 10 %. Облучение питательной среды в течение 300 с приводит к снижению темпов роста в среднем на 20 %, при этом уменьшение скорости роста стабильно в течение всего времени наблюдения. Аналогичный результат наблюдается и для динамики роста грибов рода *Candida*. Но для кишечной палочки наблюдалась обратное влияние: облучение питательной среды в течение 120 с приводит к повышению темпов роста в среднем на 27 %, а при облучении в течение 300 с – на 47 %. Наличие двойной мембраны вероятно делает клетки грамотрицательных бактерий кишечной палочки особо чувствительными к размеру кластера питательной среды и измельчение кластеров под действием лазерного излучения позволяет сделать питание более эффективным и вызывает бурный рост кишечной палочки.

Список литературы

1. Прозоркина Н.В., Рубашкина Л.А. Основы микробиологии, вирусологии и иммунологии: Учебн. пособ. для сред. спец. мед. учебн. завед. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002.
2. Лахно В.Д. Кластеры в физике, химии, биологии. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
3. Malov A.N., Seteikin A.Yu., Neupokoeva A.V., Musatova E.S., Golub I.E., Sorokina L.V., Fetschenko V.S., Vaichas A.A. The laser radiation action on the biological objects // Optik. 2013. V.124. №23. P.6034- 6041.

В.А. ВИННИЧЕНКО, Н.Н. ЕВТИХИЕВ¹, Г.Б. АЛЬТШУЛЕР²,
И.В. ЯРОСЛАВСКИЙ², А.А. КОВАЛЕНКО

НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США*

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРИМПУЛЬСНОГО ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ЛИТОТРИПСИИ

Приведены сравнительные результаты исследования оценки эффективности дробления твердых тканей (камней) и ретропульсии (смещение) камней при воздействии излучения нового суперимпульсного волоконного Тm-лазера и Ho:YAG лазера. Определен рост температуры воды при осуществлении литотрипсии с использованием данных лазеров.

V.A. VINNICHENKO, N.N. EVTIKHIEV¹, G.B. ALTSHULER²,
I.V. YAROSLAVSKY², A.A. KOVALENKO

IRE-Polus Corporation, Fryazino

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*IPG Medical, Marlborough, USA*

APPLICATION OF THULIUM FIBER LASER FOR LITHOTRIPSY

The results of the evaluation of stones ablation efficiency, stone retropulsion (displacement) caused by laser radiation are presented for Tm-fiber and Ho:YAG lasers. The water temperature increase during the lithotripsy was determine for Tm-fiber laser and Ho: YAG laser.

В основе современных медицинских аппаратов для литотрипсии (дробления камней) лежит использование излучения твердотельного Ho:YAG лазера (длина волны излучения $\lambda = 2.1$ мкм). Однако, существенным недостатком этих лазеров является короткая длительность импульсов (от 0.1 до 1 мс) с высокой пиковой мощностью, что приводит к появлению значительного эффекта ретропульсии под действием лазерного излучения, которая, в свою очередь в значительной степени влияет на длительность медицинской процедуры дробления камней. Стоит отметить, что основным хромофором, который поглощает лазерное излучение в камне, является вода, содержащаяся в порах (около 10 %). Поэтому использование волоконного Тm-лазера (длина волны излучения $\lambda = 1.94$ мкм) может в значительной степени повысить эффективность

дробления камней, так как излучение с данной длиной волны имеет в 4.5 раз больше коэффициент поглощения в воде, чем излучение Ho:YAG лазера [1-3]. Однако пиковая мощность существующих волоконных Tm-лазеров не превосходит 120 Вт, что не позволяет эффективно дробить камни [4]. Но новый суперимпульсный волоконный Tm-лазер, пиковая мощность которого в несколько раз превышает существующие Tm-лазеры, может стать альтернативой Ho:YAG лазеру для литотрипсии.

В работе представлены результаты сравнительного анализа эффективности дробления различных типов камней и ретропульсии при воздействии излучением нового суперимпульсного волоконного Tm-лазера и Ho:YAG лазера. Также приведены данные исследования роста температуры воды при дроблении камней, что является важнейшим фактором, который может привести к тепловому ожогу окружающих мягких тканей. Специально для проведения этого исследования были сконструированы и изготовлены экспериментальные установки, схемы которых приведены на рис. 1 и 2. В результате было экспериментально установлено, что новый суперимпульсный волоконный Tm-лазер имеет в 2.3 – 4.3 раза более высокую скорость дробления различных типов камней и в 2 раза более низкую ретропульсию в сравнении с Ho:YAG лазером. Кроме того, был получен одинаковый рост температуры воды при осуществлении дробления камней излучением суперимпульсного волоконного Tm-лазера и Ho:YAG лазера.

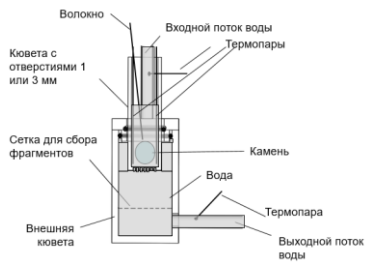


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для оценки эффективности дробления и роста температуры

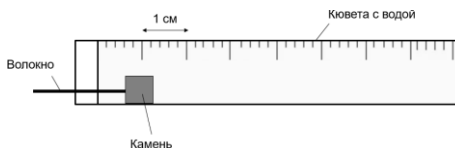


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для оценки ретропульсии

Список литературы

1. Scott N.J., Cilip C.M., Fried N.M. // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr. 2009. V.15(2). P.435-440.
2. Blackmon R.L., Irby P.B., Fried N.M. // Lasers Surg. Med. 2010. V.42(3). P.232-236.
3. Blackmon R.L., Irby P.B., Fried N.M. // JBiomed. Opt. 2011. V.16(7). P.071403.
4. Fried N.M. // Lasers Surg. Med. 2005. V.37(1). P.53-58.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.В. ПИСАРЕВА,
М.Ю. ВЛАСОВ¹, Л.Т. ВОЛОВА¹,
А.С. ТЮМЧЕНКОВА, Я.В. ФЕДОРОВА

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева
¹*Самарский государственный медицинский университет*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ КРЫС ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОСТЕОПОРОЗА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ ГИДРОКСИАПАТИТОМ

Приведены результаты экспериментов по исследованию модели остеопороза у крыс с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, а также эффективности его лечения гидроксиапатитом (ГАП). Выявлены спектральные различия между группами образцов (контрольная группа, группа с моделью остеопороза и группа с моделью остеопороза после лечения с помощью ГАП). Введены оптические коэффициенты для оценки эффективности лечения.

E. V. TIMCHENKO, P. E. TIMCHENKO, E. V. PISAREVA,
M. Yu. VLASOV¹, L. T. VOLOVA¹,
A. S. TYUMCHENKOVA, Ya. V. FEDOROVA

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev
¹*Samara State Medical University*

SPECTRAL STUDIES OF RAT BONE TISSUE IN MODELING OSTEOPOROSIS AND EFFECTIVENESS OF TREATMENT BY HYDROXYAPATITE

Presents the result of experiments on the study of the model of osteoporosis in rats using Raman spectroscopy and the effectiveness of its treatment with hydroxyapatite. Were revealed spectral differences between groups of samples (control group, group with the model of osteoporosis and a group with the model of osteoporosis after treatment with hydroxyapatite). In addition, optical coefficients were introduced to evaluate the effectiveness of treatment.

По данным Российской Ассоциации по остеопорозу, ежегодно по России регистрируется 2 млн компрессионных переломов позвоночника у женщин и 1 млн – у мужчин, ежеминутно в России происходит 17 остеопоротических переломов конечностей [1]. Поэтому подбор эффективного лечения остается первостепенной задачей.

Целью работы являются спектральные исследования костной ткани крыс при моделировании остеопороза с оценкой эффективности его лечения гидроксипатитом. Исследования были проведены с помощью экспериментального стенда. Стенд включал в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i со спектральным диапазоном 200-1200 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд RPB-785 для спектроскопии КР, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.ORB-04 с длиной волны лазерного излучения 785 нм и с шириной линии 0,2 нм [2]. Эксперимент проводился на половозрелых самках крыс возрастом 6-9 месяцев и массой 180-230 г. В качестве материалов исследования были использованы бедренные кости крыс. Кости распиливались продольно. Шлифы костей были измерены в областях головки, диафиза и эпифиза костей, однако наибольший интерес представляет головка кости, т.к. в этой области велика вероятность проявления остеопороза. Головки костей, исследуемых образцов, были измерены в 17 точках. Помимо этого, кости подвергались анализу на механическую прочность на излом и на прогиб.

Основные спектральные различия выявлены на интенсивностях линий 428 см^{-1} , 581 см^{-1} , 854 см^{-1} , 956 см^{-1} , 1033 см^{-1} , 1062 см^{-1} , $1244\text{-}1271\text{ см}^{-1}$ и 1659 см^{-1} . Также были введены оптические коэффициенты, характеризующие компонентный состав образцов костей и позволяющие оценить эффективность лечения модели остеопороза. Полученные результаты свидетельствуют о положительном эффекте от лечения гидроксипатитом модели остеопороза начального этапа развития.

Результаты исследований подтверждены проведенными механическими испытаниями.

Список литературы

1. Количество людей, которым угрожает остеопороз, в России будет только увеличиваться! [Электронный ресурс] // Российская ассоциация по остеопорозу. URL: <http://www.osteoporoz.ru/content/view/421/62/>. (Дата обращения: 16.07.2017).
2. Timchenko P.E., Timchenko E.V., Pisareva E.V., Vlasov M.Yu., Red'kin N.A., Frolov O.O. // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V.784. P.012060.

М.Ю. ГУБИН, А.В. ШЕСТЕРИКОВ,
М.Г. ГЛАДУШ^{1,2}, А.В. ПРОХОРОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Московский педагогический государственный университет*

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ КООПЕРАТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В ВОЛНОВОДНОМ СПАЗЕРЕ

Рассмотрена задача формирования субпикосекундных плазмон-поляритонных импульсов в интерфейсе металл/диэлектрик за счет коллективного распада возбуждённых квантовых точек, расположенных в диэлектрическом слое вблизи металлической поверхности. Разработан теоретический подход к выбору полупроводниковых квантовых точек и диэлектрической среды-носителя для повышения передачи энергии коллективных возбуждений квантовых точек модам поверхностных плазмон поляритонов волноводного спазера.

M. Yu. GUBIN, A. V. SHESTERIKOV,
M. G. GLADUSH^{1,2}, A. V. PROKHOROV¹

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*Moscow State University of Education*

THE FEATURES OF SURFACE PLASMON-POLARITON PULSES GENERATION VIA COOPERATIVE EFFECTS IN WAVEGUIDE SPASER

The problem of sub-picosecond plasmon-polariton pulse formation in metal/dielectric interface due to collective decay of excited quantum dots, placed in the dielectric layer near the metal surface, is considered. Theoretical approach to selection of semiconductor quantum dots and dielectric host medium to increase the energy transmission of quantum dot collective excitations into surface plasmon-polariton modes of waveguide spaser is developed.

В работе с теоретических позиций рассматриваются кооперативные эффекты, возникающие в модели плотного ансамбля полупроводниковых квантовых точек (КТ), размещенных в диэлектрической пластине вблизи металлической поверхности. Формирование плазмон-поляритонных

импульсов в представленной модели связано с процессом коллективного распада возбуждений в КТ, аналогично эффекту сверхизлучения (СИ) в оптике [1]. Однако, в отличие от оптического СИ, энергия коллективных возбуждений конвертируется не в оптический импульс, а обеспечивают ближнеполевую накачку для распространяющихся вдоль границы металл/диэлектрик плазмон-поляритонов. Параметры моделирования, в том числе материал и размер КТ, выбираются исходя из условия соответствия частоты межзонного перехода и собственных частот формируемых плазмонов. Динамика процесса формирования плазмон-поляритонных импульсов описывается системой самосогласованных уравнений на поляризацию, разность населенности и частоту Раби электромагнитного поля по аналогии с моделью локализованного спазера [2]. Характерным параметром задачи является время установления квантовых корреляций t_R между отдельными КТ вблизи металлической пластинки, а критерием наблюдаемости эффекта становится соотношение между t_R и временем затухания плазмон-поляритонов t_p .

В ходе выполненного моделирования проведено сравнение различных режимов формирования плазмон-поляритонных импульсов на границе золото/диэлектрик, когда в качестве накачки используются CdS КТ. Показано, что в условиях сосредоточенной модели и при учете реальных, взятых из экспериментальных работ, значений скоростей релаксации для КТ и поверхностных плазмон-поляритонов, коллективные эффекты обладают конкурентным преимуществом и приводят к формированию субпикосекундных плазмон-поляритонных импульсов. Используя приближение среднего поля и полагая $t_R \ll t_p$, а также при учете локального поля для плотного ансамбля КТ в диэлектрическом окружении, самосогласованная задача сведена к уравнению нелинейного маятника с дополнительным слагаемым, ответственным за когерентный обмен энергией между формируемым импульсом и КТ в среде-носителе. Решение уравнения определяет профиль генерируемых импульсов, форма которых полностью совпадает с результатами численного моделирования исходной самосогласованной системы.

Список литературы

1. Benedict M.G., Trifonov E.D. // Phys. Rev. A. 1988. V.38. P.2854.
2. Stockman M.I. // J. Opt. 2010. V.12. P.024004.
3. Кузнецов Д.В., Рерих В.К., Гладуш М.Г. // ЖЭТФ. 2011. V.140. P.742.

А.О. СЕМКИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ, В.О. ДОЛГИРЕВ, Д.И. СОН
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГАУССОВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
В БЕССЛЕПОДОБНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ
ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ФПМ-ЖК,
УПРАВЛЯЕМЫМИ ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ**

В работе разработана теоретическая модель дифракции световых пучков на голографически сформированных дифракционных оптических элементах (ДОЭ) в фотополимерно-жидкокристаллических (ФПМ-ЖК) композициях. ДОЭ имеют специальную структуру, предназначенную для преобразования падающих световых полей в бесселеподобные. Методом численного моделирования исследовано влияние внешнего электрического поля на эффективность преобразования световых пучков. Показано, что в ФПМ-ЖК возможно создание электрически управляемых элементов преобразования.

A.O. SEMKIN, S.N. SHARANGOVICH, V.O. DOLGIREV, D.I. SON
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**CONVERSION OF GAUSSIAN LIGHT BEAMS
INTO BESSEL-LIKE ONES BY HOLOGRAPHIC
DIFFRACTIVE ELEMENTS IN PDLC CONTROLLABLE
BY EXTERNAL ELECTRIC FIELD**

A theoretical model of light beams diffraction on holographically formed diffractive optical elements (DOE) in polymer-dispersed liquid crystals (PDLC) is developed. DOEs have a special structure designed to convert the incident light fields into Bessel-like. The influence of an external electric field on the light beams conversion efficiency is studied by numerical simulations. It is shown that it is possible to create electrically controllable transformation elements in PDLCs.

Бесселеподобные пучки лазерного излучения в настоящее время представляют большой интерес в связи с огромным количеством возможных прикладных применений. Самыми распространенными являются устройства манипулирования наноразмерными объектами [1]. Таким образом, актуальным представляется поиска технологичных и дешевых методов формирования таких пучков. Наиболее распространенными среди них является метод преобразования волнового фронта Гауссовой волны устройствами аксиконной оптики [2, 3], а также

дифракционными элементами [4, 5]. Одним из наиболее эффективных методов формирования дифракционных элементов является голографический с использованием фоточувствительных сред, в частности, фотополимеризующихся.

В данной работе проведено теоретическое исследование эффективности преобразования световых пучков в Бесселеподобные в зависимости от параметров голографического дифракционного оптического элемента (ДОЭ) и воздействия на него внешнего электрического поля. В качестве среды для формирования ДОЭ рассмотрена фотополимеризующаяся композиция, содержащая жидкие кристаллы.

Под эффективностью преобразования пучков в данной работе понимается дифракционная эффективность ДОЭ при дифракции падающего пучка на основной пространственной гармонике показателя преломления. Ранее в работе [6] была показана зависимость амплитуды пространственных гармоник показателя преломления ФПМ-ЖК от его состава и условий формирования ДОЭ. Кроме этого, присутствие в материале молекул жидкого кристалла обуславливает зависимость показателя преломления от внешнего электрического поля. Таким образом, данная работа является продолжением исследований [6] в части исследования взаимодействия световых полей с голографическими ДОЭ.

Решение задачи дифракции выполнено путем поиска решений системы уравнений связанных волн в неоднородной анизотропной среде в присутствии внешних воздействия по методике, описанной в [7].

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект № 3.1110.2017/4.6).

Список литературы

1. Соколовский Г.С., Лосев С.Н., Соболева К.К. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т.57 (11). С.53-59.
2. Пятницкий Л.Н., Коробкин В.В. // Труды ИОФАН. 2000. Т.57. С.59-114.
3. Курилкина С.Н., Ушакова Е.Е. // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2010. №13. С.7-12.
4. Костылев А.Ю., Ильина И.В., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т.20 (11). С.1028-1032.
5. Казак А.А., Казак Л.А., Толстик А.Л., Мельникова Е.А. // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2011. №1. С.3-6.
6. Семкин А.О., Шарангович С.Н. // Известия вузов. Физика. 2017. Т.60 (11). С.109-115.
7. Семкин А.О., Шарангович С.Н. // Известия российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т.77 (12). С.1723-1726.

С.И. ХАЛИЛОВ, А.Ф. РЫБАСЬ, А.Э. ИБРАГИМОВ,
 М.А. ЯВОРСКИЙ, К.Н. АЛЕКСЕЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВИХРЕВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР

Экспериментально продемонстрирована возможность устойчивой передачи сингулярного пучка, по маломодовому оптическому волокну. Для такой передачи, оптическое волокно навивалось на кварцевую трубку, создавая наведенную анизотропию. При такой методике, в волокне, фундаментальная мода смещалась к периферии, а не вихревые моды высвечивались, формируя в сердцевине волокна оптический вихрь, с той же величиной топологического заряда и состояния поляризации, что были на входе.

S.I. HALILOV, A.F. RUBASS, A.E. IBRAGIMOV,
 M.A. YAVORSKY, C.N. ALEXEYEV, B.V. SOKOLENKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

VORTEX FIBER-OPTICAL FILTER

Experimentally demonstrated the possibility of sustained transmission of singular beam, low mode optical fiber. For such transmission, optical fiber has been preferred in a quartz tube, creating an induced anisotropy. With this method, the fiber, the fundamental mode shifted to a peri-fair, and not the vortex of fashion was displayed, forming in the fiber core of the optical vortex, with the same value of topological charge and polarization state that was at the entrance.

Использование оптических вихрей в качестве сигнала, позволит увеличить на порядок количество каналов в волокне. Но для такой методики, нужно использовать не одномодовое волокно, а волокно с минимальной величиной волноводного параметра $V = 3.8$ - маломодовое волокно. При попадании сингулярного пучка на входной торец волокна, в нем реализуются 12 мод, а в частности HE_{11}^x, HE_{11}^y или $HE_{11}^+, HE_{11}^-, TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}^{ev}, HE_{21}^{odd}, HE_{31}^{ev}, HE_{31}^{odd}, EH_{11}^{ev}, EH_{11}^{odd}, HE_{12}^{ev}, HE_{12}^{odd}$.

Для подавления фундаментальной и невихревых мод, а также сохранения величины топологического заряда (l) и состояния поляризации (s) сингулярного пучка, волокно навивалось на кварцевую трубку, с тем же показателем преломления что и волокно, для избавления от механических напряжений между волокном и трубкой. При такой навивке, в волокне создавалась наведенная анизотропия, которая смещала

к периферии фундаментальную моду, а невихревые моды высвечивались, формируя в сердцевине волокна вихрь, с той же величиной топологического заряда и состояния поляризации, что и на входе.

Для примера, было взято оптическое волокно с круглой сердцевиной и оболочкой, имеющий волноводный параметр $V = 3.8$. Волокно навивалось на кварцевую трубку с радиусом $R = 3$ мм, шаг (Н) витков составил $H = 2$ мм и на торец волокна падал сингулярный пучок с $l = -1$ и $s = +1$. Оптимальное число витков (n) для фильтрации, составило $n = 15-18$ витков (рис. 1).

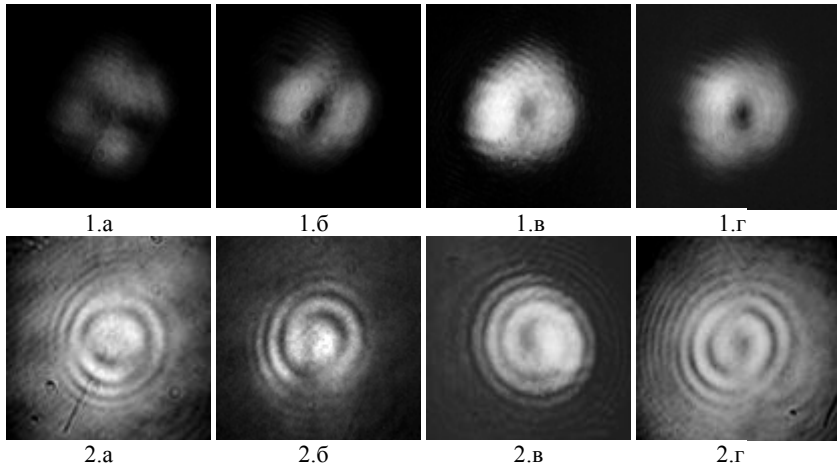


Рис. 1. Распределение интенсивности (1) и интерференции (2) поля волокна, возбуждаемым сингулярным пучком $l = -1$ и $s = +1$ с фундаментальной модой, при радиусе навивки $R = 3$ мм, шаге $H = 2$ мм и числом витком n равным: $n = 1$ (а), $n = 5$ (б), $n = 10$ (в), $n = 15$ (г)

Д.У. ТАШТИМИРОВА, Е.А. САВЧЕНКО,
Е.Т. АКСЁНОВ, В.Д. КУПЦОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ НА ОСНОВЕ БЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ

Приведены результаты эксперимента по формированию бesselева пучка. В ходе работы была разработана экспериментальная установка оптического пинцета с использованием бesselевых пучков.

D.U. TASHTIMIROVA, E.A. SAVCHENKO, E.T. AKSENOV,
V.D. KUPTSOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

OPTICAL TWEEZERS BASED ON BESSEL BEAMS

The results of the experiment on the formation of Bessel beam are presented. The experimental setup of optical tweezers on Bessel beams was developed.

Оптический пинцет на основе бesselевых пучков имеет ряд преимуществ. Такая оптическая ловушка позволяет захватывать частицы, разнесенные на некоторое расстояние друг от друга. Это объясняется свойством самовосстановления бesselева пучка. Другое преимущество оптического пинцета на бesselевом пучке состоит в их способности захватывать несколько частиц разного размера при условии достижения оптимальной мощности [1].

Существует несколько способов формирования бesselевых пучков Фурье преобразованием, в частности кольцевого распределения светового поля. Данный метод обладает существенным недостатком: низкой эффективностью в силу того, что большая часть излучения теряется при прохождении через кольцевую щель [1]. Однако, есть способ, при котором для формирования бesselевых пучков используется вся энергия излучения: прохождение пучка через аксикон [2]. Аксикон обладает осевой симметрией и за счет отражения и преломления изображает свет от точечного источника в осевой отрезок. Другое преимущество состоит в изображении точки с меньшими абберациями [3, 4].

Целью данного эксперимента является разработка методики формирования бесселевых пучков и конструирование лабораторной модели оптического пинцета для манипулирования микрочастицами.

В данной работе нами были получены бесселевы пучки при прохождении лазерного луча через аксикон с углом при вершине 140° . Аксикон трансформирует фазовый фронт плоской волны таким образом, что он становится не сферическим, а коническим.

На рис. 1 показана интерференционная картина, полученная в ходе эксперимента. Она имеет вид яркого центрального луча, окруженного системой колец [5].

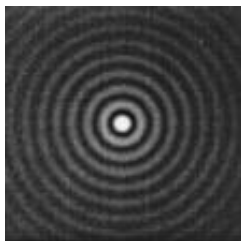


Рис. 1. Поперечное распределение интенсивности в бесселевом пучке нулевого порядка

После завершения этапа формирования бесселева пучка с использованием аксикона, нами была разработана экспериментальная установка. Свет длиной волны 511 нм попадает на аксикон диаметром 10 мм и на объектив, фокусирующий бесселев пучок. Образуется градиентное световое поле, в котором происходит захват частиц разных размеров от 1 до 10 мкм в водном растворе. Управление оптической ловушкой контролируется через микроскоп видеокамерой с ПЗС матрицей [6]. Первые экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о применимости данной экспериментальной установки для захвата и управления микрочастицами.

Список литературы

1. Соколовский Г.С., Лосев С.Н., Соболева К.К. // Письма в ЖТФ. 2014. Т.40. №11. С.53-59.
2. Brunel M., Mgharaz D., Coetmellec S. // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. V.20. P.742-744.
3. Котова С.П., Рахматулин М.А., Филькин В.В. // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2001. Т.3. №1. С.48-54.
4. Афанасьев А.А., Катаркевич В.М. и др. // Журнал прикладной спектроскопии. 2002. Т.69. №5. С.675-679.
5. Arlt J., Garcés-Chavez V., Sibbett W. // Optical Communications. 2001. V.42 (50). P.239-242.
6. Леженникова К.А., Савченко Е.А. и др. // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. 2016. С.184-187.

Л.В. ГОРЯЧЕВ

Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Нижегородская обл.

НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА РАССЕЯННОГО СВЕТА ПРИ РЕШЕНИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЗАДАЧ

Приведены результаты экспериментов по исследованию дифракции света на экранах и отражательных элементах. Обнаружено несоответствие распределения интенсивности света в дифракционных картинах, получаемых после отражения от зеркал, общепринятым представлениям об этом. Выявлены причины этого несоответствия. Делается вывод о необходимости учета рассеянного света в расчетах интенсивностей пучков излучения, ограничиваемых по апертуре оптическими элементами.

L.V. GORYACHEV

Sarov State Physics and Technical Institute NRNU MEPhI, Nizhny Novgorod region

THE NEED TO CONSIDER EDGE WAVE AT THE SOLUTION OF DIFFRACTION PROBLEMS

The results of experiments on the study of light diffraction on screens and reflecting elements are presented. A discrepancy is found between the conventional concepts of the distribution of light intensity in diffraction patterns obtained after reflection of light from mirrors. The reasons for this discrepancy are revealed. It is proposed to introduce the concept of the scattering coefficient for calculating the radiation intensities of light beams limited by the aperture to optical elements.

Анализ условий опытов по дифракции света, описываемых в учебниках, показывает, что на протяжении столетий почти все они проводились с пучками света, проходящими через диафрагмы. Возможно, это является следствием абсолютизации принципа Гюйгенса-Френеля, согласно которому различий в дифракционных картинах, получаемых в проходящих и отраженных пучках, не может быть в принципе. Поэтому при ограничении световых пучков (неважно как это делается), согласно волновой теории должны появляться одинаковые дифракционные картины. Однако в работах [1, 2] показана возможность получения ограниченного пучка света без дифракционных искажений в результате всего лишь одного отражения от зеркала. В [2] описаны техника эксперимента и технология изготовления «бездифракционных» зеркал. Ключом к решению данной задачи явился вывод о том, что причиной

появления дифракционных картин являются не мифические вторичные источники света, якобы излучающие мнимые сферические волны, а реальные источники света, расположенные вдоль границ отражателей и рассеивающие свет в разных направлениях. Лишение возможности попадания рассеянного света в области, где свет распространяется по законам геометрической оптики, исключает возможность образования дифракционных искажений в отраженном пучке (рис. 1).

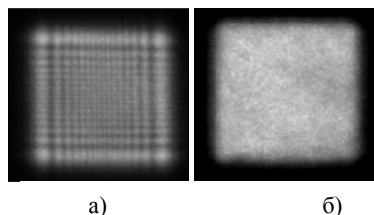


Рис. 1. Фотографии сечений пучков света: прошедшего через квадратную диафрагму $12 \times 12 \text{ мм}^2$ на расстоянии 9 м от диафрагмы по ходу луча (а); отраженного от квадратного «бездифракционного» зеркала $12 \times 12 \text{ мм}^2$ на расстоянии 9 м от зеркала (б)

Объяснить приведенные результаты в рамках существующей волновой оптики пока не удастся. В связи с этим, на наш взгляд, должна быть разработана альтернативная методика расчетов дифракционных задач, которая будет учитывать влияние реально существующей граничной волны (рассеянного света). Данный вывод подкрепляется результатами экспериментов, в которых достигается контрастность дифракционных картин, существенно превышающая общепринятые её значения, предсказываемые теорией дифракции (рис. 2).

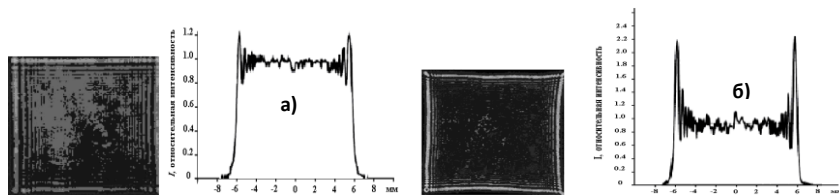


Рис. 2. Картины распределения интенсивности излучения по поперечному сечению пучка и зависимости этой интенсивности от расстояния до центра пучка: свет прошел через квадратную диафрагму в бумаге (а); свет отразился от металлического зеркала с краями, обработанными на шлифовальном круге (б), расстояния от дифрагирующих элементов до дифракционных картин – около 1 м

Список литературы

1. Горячев Л.В., Горячев В.Л. // *Фундаментальная и прикладная физика*. 2012. №1. С.22.
2. Горячев Л.В., Горячев В.Л. // *Фундаментальная и прикладная физика*. 2012. №1. С.29.

Л.В. ГОРЯЧЕВ

Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Нижегородская обл.

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЗАДАЧ

Представлены результаты экспериментов, в которых контрастность дифракционных картин меняется от нуля до величин, многократно превышающих наблюдаемые в классических дифракционных опытах и предсказываемые теорией дифракции. Предлагается альтернативная методика решения дифракционных задач, в которой учитывается влияние интенсивности граничной волны (рассеянного света) на контрастность дифракционных картин.

L.V. GORYACHEV

Sarov State Physics and Technical Institute NRNU MEPhI, Nizhny Novgorod region

INTRODUCTION OF SCATTERING COEFFICIENT FOR SOLVING DIFFRACTION PROBLEMS

The results of experiments are presented in which the contrast of diffraction patterns varies from zero to magnitudes many times greater than those observed in classical diffraction experiments and predicted by the theory of diffraction. An alternative method for solving diffraction problems is proposed, which takes into account the influence of the intensity of the boundary wave (scattered light) on the contrast of the diffraction patterns.

На заре возникновения теории дифракции среди обсуждаемых моделей дифракции особое внимание было уделено моделям Френеля и Юнга. Первая основывалась на известном принципе Гюйгенса. Во второй модели считалось, что дифракционная картина есть результат интерференции светового потока, следующего по законам геометрической оптики, со светом, исходящим с краев дифрагирующего тела. Модель Френеля, подкрепленная математическим описанием распространения волн, получила всеобщее признание. На протяжении столетий с её помощью решаются многочисленные дифракционные задачи. Вместе с тем ряд известных теоретиков предыдущих поколений (см., например, [1]) исследовали возможность решения задач дифракции в рамках модели Юнга. Общим итогом их работы можно считать набор из 4-х уравнений, названный в [1] «Представлением Рабиновича дифракционного интеграла Кирхгофа». Путем строгих математических преобразований было

показано, что задачи дифракции могут быть решены как в рамках модели Френеля, так и модели Юнга. Однако ни один из этих подходов не позволяет пока объяснить результаты опытов, представленные в работах [2, 3]. Для адекватного их описания в формулы для расчетов светового поля необходимо внести зависимость контраста дифракционной картины от интенсивности граничной волны. В [3] показано, что это можно сделать, воспользовавшись усовершенствованным представлением Рабиновича. С этой целью в выражении для результирующего значения поля $U(P)$ «дифракционное слагаемое» $U^{(d)}(P)$ умножается на коэффициент рассеяния $K_{\text{расс}}$. В итоге получается выражение для расчета дифракционной картины, учитывающее зависимость её контрастности от интенсивности граничной волны: $U(P) = U^{(g)}(P) + K_{\text{расс}} \cdot U^{(d)}(P)$. Здесь $U^{(g)}(P)$ представляет возмущение, предсказываемое геометрической оптикой, а $U^{(d)}(P)$ представляет влияние рассеянного света. В [3] предлагается также методика нахождения $K_{\text{расс}}$ для дифрагирующих тел. Используя результаты экспериментов (рис. 1), в качестве первого приближения получена функция (рис. 2), показывающая взаимосвязь контрастности дифракционной картины $\Delta I/I_0$ и коэффициента $K_{\text{расс}}$. Здесь ΔI – разница между максимумом интенсивности и её средним значением $I_0 = 1$.

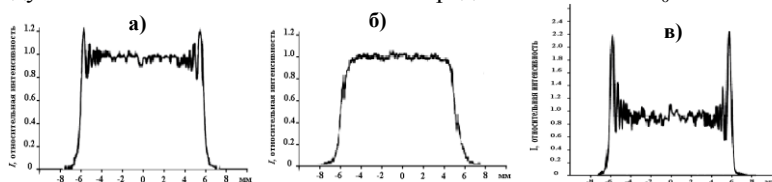


Рис. 1. Распределение интенсивности света по поперечному сечению пучка при различных значениях коэффициента рассеяния: $K_{\text{расс}} = 1.0$ (а); $K_{\text{расс}} = 0$ (б); $K_{\text{расс}} = 5.0$ (в)

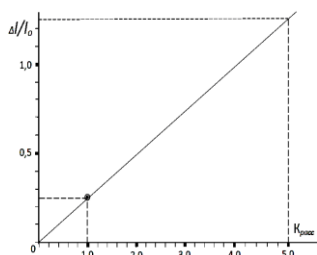


Рис. 2. Зависимость максимального превышения относительной интенсивности излучения в дифракционной картине от коэффициента рассеяния света на краях дифрагирующих элементов

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. // Основы оптики. М.: Наука, 1973.
2. Горячев Л.В. и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2016. №7-8. С.103.
3. Горячев Л.В. и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2017. №13-15. С.144.

П.В. КАРЕВ

ООО «Промышленная метрология», Санкт-Петербург

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Ультразвуковые пьезоэлектрические двигатели позволяют реализовывать системы оптической стабилизации для оптоэлектроники. Пьезоэлектрические затворы позволяют производить коррекцию неоднородности оптического поля. Рассматривается принцип действия ультразвукового двигателя L1B2, обеспечивающего высокоточное линейное и поворотное микро перемещение в малых габаритах.

P.V. KAREV

Industrial metrology Co LTD, Saint-Petersburg

ULTRASONIC PIEZO MOTORS FOR OPTICAL STABILIZATION

Ultrasonic piezoelectric motors allow the implementation of optical stabilization systems for optoelectronics. Piezo shutters allow providing optical field non-uniformity correction. The L1B2 ultrasonic motor operation, which provides a high-precision linear and rotary micro-movement in small dimensions, is considered.

Пьезоэлектрические ультразвуковые двигатели обеспечивают высокую скорость и высокую точность [1-7]. Линейный двигатель стоячей волны основан на сочетании первичных продольных и вторичных изгибных режимов (двигатель L1B2). Пьезодвигатели L1B2 (рис. 1) позиционируются с повторяемостью в диапазоне десятков нанометров в режиме переменного тока и до долей нанометров в режиме постоянного тока. Рассматривается два семейства двигателей: HR и EDGE. Пьезодвигатели HR работают от синусоидального напряжения с рабочей частотой 39,6 кГц, обеспечивающей максимальное усилие до 4 Н на приводной элемент (при 5 Вт потребляемой мощности на элемент) и максимальную линейную скорость выше 300 мм/с. Малогабаритные пьезодвигатели EDGE применяются в оптико-электронных модулях и приводятся в действие напряжением до 11 В переменного тока, обеспечивая максимальную блокирующую силу до 0,35 Н (потребляемая мощность до 0,75 Вт) и максимальную линейную скорость выше 200 мм/с.

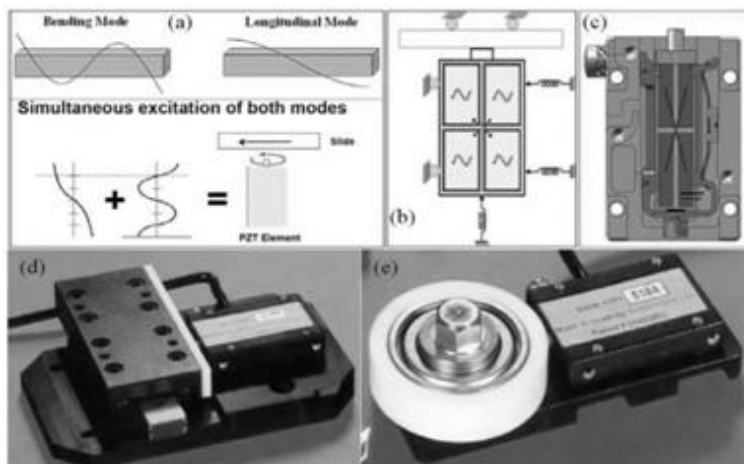


Рис. 1. Основная конструкция пьезоэлектрического ультразвукового двигателя L1B2: схематическое представление одновременного возбуждения продольного и изгибного режимов (a); схематическое представление предварительной нагрузки пьезоэлектрического элемента на движущуюся сборку (b); Пример чертежа двигателя Nanomotion типа HR1, основанного на одном пьезоэлектрическом элементе L1B2 (Nanomotion HR типа), реализующем схему предварительной нагрузки элемента, которая схематически показана на рис. 1b (c); изображение линейной сборки, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1 (d); изображение оси вращения, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1 (e)

Список литературы

1. Uchino K. Piezoelectric ultrasonic motor: Overview. // Smart Mater. Struct. 1998. V.7. P.273–285.
2. Sashida T., Kenjo T. An Introduction to Ultrasonic Motors. Clarendon Press: Oxford, UK, 1993.
3. Nanomotion Ltd. Motion Systems. Available online: <http://www.nanomotion.com/product-type/motion-systems/> (accessed on 11 April 2016).
4. Wiwattananon P., Bryant R.G. Performance Comparisons and Down Selection of Small Motors for Two-Blade Heliogyro Solar Sail 6U CubeSat. // NASA Technical Report NASA/TM-2015-218784. 2015. Available online: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150017043> (accessed on 11 April 2016).
5. Uchino K. Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers // Defense Technical Information Center Document ADA429659. 2003. Available online: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA429659> (accessed on 11 April 2016).
6. Hemsel T., Mracek M., Twiefel J., Vasiljev P. Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations // Ultrasonics. 2006, V.44. E591–E596.
7. <http://www.nanomotion.com/motion-product/edge-motor/> (accessed on 11 April 2016).

Д.Р. ХАРАСОВ¹, А.В. КОНЯШКИН^{1,2}, О.А. РЯБУШКИН^{1,2}
¹*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*
²*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОГО ВОЛОКНА

Продемонстрирована возможность использования пьезоэлектриков для измерения продольного распределения температуры активных волокон в условиях генерации и усиления лазерного излучения с помощью радиочастотной импедансной спектроскопии. Измерена зависимость температуры разогрева активного волокна иттербиевого лазера при разных уровнях мощности накачки.

D.R. KHARASOV¹, A.V. KONYASHKIN^{1,2}, O.A. RYABUSHKIN^{1,2}
¹*Moscow Institute of Physics and Technology State University), Dolgoprudny*
²*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

PIEZOELECTRIC RESONANCE TEMPERATURE SENSOR FOR ACTIVE FIBERS

It was demonstrated that radiofrequency impedance spectroscopy of piezoelectric crystals allows measurements of longitudinal temperature distribution of active fibers under conditions of lasing and amplification. Heating temperature of ytterbium active fiber was measured in lasing conditions at different pump levels.

Мощность излучения современных иттербиевых волоконных лазеров достигает 10 кВт для одномодовых лазеров и 100 кВт для многомодовых лазеров. При этом в процессах генерации и усиления излучения часть мощности накачки неизбежно переходит в тепло, что ведёт к нагреву волокна, который приводит к изменению характеристик лазера, таких как эффективность, выходная мощность, качество пучка, длина волны излучения в режиме свободной генерации [1]. Тепловое разрушение полимерной оболочки [2] является одним из главных ограничивающих факторов дальнейшего роста мощности волоконных лазеров. Поэтому крайне важно уметь измерять температуру волокна в процессах генерации и усиления излучения.

Целью данной работы является измерение температуры активных световодов в условиях генерации и усиления лазерного излучения. Для

этого использовался монокристалл кварца в форме цилиндра с отверстием для волокна. Кварцевый резонатор помещается между обкладками конденсатора, к которому прикладывается напряжение от радиочастотного (РЧ) генератора (рис. 1). При совпадении частоты внешнего электрического поля с одной из собственных частот кварцевого резонатора возбуждается пьезоэлектрический резонанс, который детектируется с помощью синхронного детектора [3].

Измерены сдвиги частот некоторых пьезоэлектрических резонансов кристалла кварца при температурах 20 - 100 °С в условиях однородного разогрева. Для сопоставления температур разогрева резонатора и волокна использовалось волокно с медной сердцевиной, через которое пропускался электрический ток [4]. Температуры медной сердцевины определялась по изменению сопротивления. Использование «медного» волокна позволяет определить коэффициент теплоотдачи из стационарного значения температуры и по кинетике охлаждения. Измерена зависимость температуры разогрева активного волокна 100-ваттного-иттербиевого лазера при разных уровнях мощности накачки. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с результатами математического моделирования (рис. 2).



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

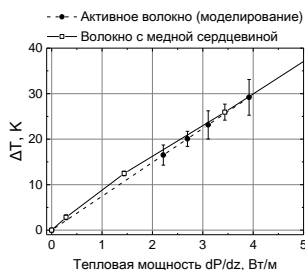


Рис. 2. Разогрев волокна при разных уровнях тепловой мощности

Список литературы

1. Brilliant N.A., Lagonik K. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser // Opt. Lett. 2001. V.26. №21. P.1669-1671.
2. Lapointe M., et al. Thermal Effects in High Power CW Fiber Lasers // Proc. SPIE. 2009. V.7195. P.71951U.
3. Pigarev A.V, Konyashkin A.V., Ryabushkin O.A. Impedance spectroscopy for measuring low optical absorption coefficients of nonlinear optical crystals // SPIE Photonics Europe. 2016. P.98941T.
4. Ryabushkin O.A., Shaidullin R.I., Zaytsev I.A. Radio-frequency spectroscopy of the active fiber heating under condition of high-power lasing generation // Opt. Lett. 2015. V.40(9). P.1972-1975.

К.А. БОРОДАКО, К.А. ДМИТРИЕВА, А.В. ШЕЛЯКОВ,
А.А. ИВАНОВ, А.А. ТИМОФЕЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ОБРАТИМОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ

Работа посвящена разработке и исследованию экспериментальных образцов микромеханического элемента (привода) на основе быстрозакаленного сплава TiNiCu, в котором в результате воздействия лазерного излучения формируется слоистый аморфно-кристаллический композит, проявляющий обратимый эффект памяти формы. Методом фокусированных ионных пучков изготовлена ламель толщиной 5 мкм, шириной 7 мкм и длиной 100 мкм, обратимо изгибающаяся с перемещением своего конца на 2,5 мкм в цикле нагрев-охлаждение.

K.A. BORODAKO, K.A. DMITRIEVA, A.V. SHELYAKOV,
A.A. IVANOV, A.A. TIMOFEEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

APPLICATION OF LASER RADIATION FOR FABRICATION OF MICROMECHANICAL ACTUATOR BASED ON TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT

The work deals with production and research of experimental samples of micromechanical element (actuator) based on the rapidly quenched TiNiCu alloy, in which as a result of impact of the laser radiation a structural amorphous-crystalline composite with two-way shape memory effect is formed. By the technique of focused ion beams a lamella with thickness of 5 microns, a width of 7 microns and 100 microns in length was obtained, bending reversibly to 2.5 microns in the heating-cooling cycle.

Сегодня научно-технический прогресс требует создания миниатюрных исполнительных элементов, способных манипулировать микро- и нанообъектами. На данный момент основная сфера применения сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в микромеханике – изготовление устройств, работающих в цикле нагрев-охлаждение, и здесь наиболее предпочтителен обратимый ЭПФ, когда изменение формы элемента происходит как при нагреве (реализация однократного ЭПФ), так и при охлаждении (за счет реализации возвратного механизма, например, использования внешнего упругого элемента или поля внутренних

механических напряжений). Обратимый ЭПФ, в частности, при определенных условиях возникает в сплавах на основе TiNiCu со слоистой аморфно-кристаллической структурой. На сегодняшний день показана эффективность получение такого структурного композита в тонкой ленте сплава TiNiCu экстремальными воздействиями на ее поверхность, например, лазерной обработкой или воздействием периодического разряда в потоке жидкости [1, 2].

Целью данной работы являлось изготовление экспериментальных образцов микромеханического элемента с помощью метода фокусированных ионных пучков из быстрозакаленных лент сплава TiNiCu с обратимым ЭПФ, полученным в результате локальной модификации поверхностного слоя коротким импульсом лазерного излучения.

В качестве исходного материала была выбрана аморфная лента из сплава Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅. Лента толщиной около 35 мкм была получена методом быстрой закалки из расплава [3] и затем прокатана на 24-валковом стане до толщины 19-20 мкм. При помощи электрохимической полировки было достигнуто утонение ленты до толщины около 5 мкм. Полученная аморфная лента изотермически кристаллизовалась в муфельной печи при температуре 500 °С в течение 6 минут для придания памяти формы на изгиб с радиусом R = 0,5 мм.

Для формирования обратимого ЭПФ в кристаллических образцах использовался метод экстремального воздействия лазерным излучением на их поверхность, описанный в работе [4].

Из полученного образца с обратимым ЭПФ методом фокусированных ионных пучков изготовлена ламель толщиной 5 мкм, шириной 7 мкм и длиной 100 мкм. Показано, что ламель обладает обратимым ЭПФ на изгиб с перемещением своего конца на 2,5 мкм.

Список литературы

1. Шейфер Д.В., Бородако К.А., и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т.5. №2. С.150-155.
2. Borodako K.A., Grigoriev A.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V.737. P.012027.
3. Shelyakov A.V., Matveeva N.M., Larin S.G. // in Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications / eds. F. Trochu, V. Brailovski. Canadian Inst. of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1999. P.295-303.
4. Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., et al. // Smart Materials and Structures. 2015. V.24. No.11. P.115031.

В.М. НЕМЕЦ, С.А. ПЕГАНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

**ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ
В ИССЛЕДОВАНИИ СПЕКТРОВ СРЕДНЕГО
ИК-ДИАПАЗОНА АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Приведены результаты исследования возможностей дисперсионного анализа абсорбционных спектров автомобильного топлива в области среднего ИК-излучения. В работе продемонстрирована высокая чувствительность ИК-спектров к изменению состава топлива и ограниченность использования в качестве аналитического сигнала интегрального коэффициента поглощения в отдельных интервалах длин волн.

V.M. NEMETZ, S.A. PEGANOV

Saint Petersburg State University

**ANALYSIS OF VARIANCE IN THE STUDY
OF THE MID-IR SPECTRA OF AUTOMOBILE FUEL**

Presents results of research of possibilities of analysis of variance of the absorption mid-IR spectra of motor fuel. Shown high sensitivity of mid-IR spectra to changes in fuel composition. Shown limited use as an analytical signal integrated absorption coefficient in individual intervals of wavelengths.

Развитие различных направлений нефтеперерабатывающей отрасли тесно связано с развитием существующих и созданием новых аналитических методов исследования нефтепродуктов. Одним из методов, в большой степени удовлетворяющим требованиям, предъявляемым к методам текущего контроля, является абсорбционный оптико-спектральный метод [1-5].

Целью работы является исследование возможностей по использованию абсорбционных ИК-спектров бензинов в производственных целях и без применения методов с декоррелирующими преобразованиями(методов главных компонент, проекции на латентные структуры).

Исследование проводилось на 19 партиях бензина марки АИ-95, приготовленных на Киришском (Ленинградская область) нефтеперерабатывающем заводе (КИНЕФ). Для каждой партии поставлялся образец товарного бензина, нормируемые параметры которого соответствовали норме, и специальные образцы бензинов, у

которых один из параметров лежал на границе допустимых значений. Измерение спектров провели на Фурье-спектрометре Nicolet 6700 с кюветой 72 мкм.

Разность спектров товарных бензинов и специальных бензинов на 1-2 порядка превысила расходимость повторных измерений спектров (рис. 1), что свидетельствует о наличии чувствительности ИК-спектров к составу исследуемого бензина. Однако, неконтролируемые вариации компонентного состава полуфабрикатов, в процессе их производства, не позволяют выбрать отдельную длину волн для удовлетворительной идентификации образцов по типу норма/брак. Для наиболее слабой формулировки задачи вероятность ошибка классификации бензинов по этому признаку не лучше 20 %.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Геомодель».

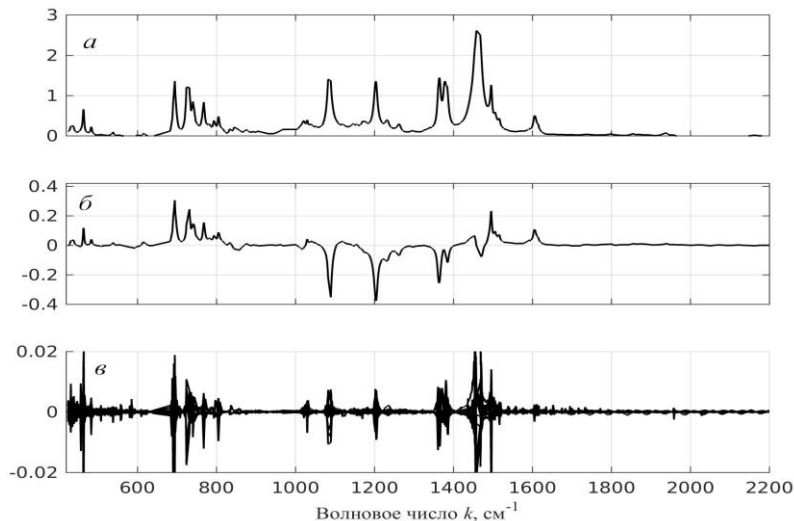


Рис. 1. ИК-спектры оптической плотности: бензина АИ-95 (а), разностный спектр образца с максимально допустимой объёмной долей ароматических у/в и товарного бензина (б), отклонения спектров проб одного бензина от их среднего (в)

Список литературы

1. Власова И.В., Вершинин В.И., Шелпакова А.С. // Вестник ОмГУ. 2010. №2. С.14-24.
2. Королев В.Н., Баругин А.В., Цареградский В.Б. // ЖТФ. 2000. Т.70. В.9. С.83-88.
3. Kelli J.J., Callis J.B. //Anal. Chem. 1990. V.62. N4. P.1444-1451.
4. Balabin R.M., Safieva R.M., Lomakina E.J. //Anal. Chim. Acta. 2010. V.671. N.1-2. P.27-35.
5. Борисов В.Б., Немец В.М. и др. // Аналитика и контроль. 2000. Т.4. №2. С.151-156.

О.Б. МАВРИЦКИЙ, А.И. ЧУМАКОВ, А.Н. ЕГОРОВ,
А.А. ПЕЧЕНКИН, Д.В. САВЧЕНКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**МЕТОД ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ
НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ, ОСНОВАННЫЙ
НА ЛОКАЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ УЛЬТРАКОРОТКИМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Рассматривается метод локального облучения ультракороткими лазерными импульсами для оценки радиационной стойкости полупроводниковых приборов космических аппаратов, не требующий калибровки на ионных источниках, обсуждаются его возможности и преимущества. Приведено сравнение результатов оценки параметров радиационной стойкости, полученных данным методом и методом сфокусированного лазерного пучка.

O.B. MAVRITSKII, A.I. CHUMAKOV, A.N. EGOROV,
A.A. PECHENKIN, D.V. SAVCHENKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**THE LASER-ONLY SINGLE-EVENT EFFECTS TEST
METHOD FOR SPACECRAFT ELECTRONICS BASED
ON ULTRASHORT-PULSED-LASER LOCAL IRRADIATION**

The laser-only method for testing the radiation hardness of semiconductor devices for spacecraft applications based on ultrashort-pulsed local laser irradiation and not requiring calibration by ions is considered, its capabilities and advantages are discussed. The comparison of the results, obtained by local and focused laser irradiation methods, is provided.

Одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), вызванные воздействием высокоэнергетичных ионов, протонов и нейтронов на полупроводниковые приборы и интегральные схемы (ПП и ИС) могут существенно снизить надежность их функционирования в реальной радиационной обстановке, особенно в условиях радиационного фона космического пространства. Наряду с традиционными методами оценки чувствительности ПП и ИС к ОРЭ, использующими ускорители заряженных частиц, в последнее время начали также широко применяться методы, основанные на сфокусированном лазерном излучении ультракороткой длительности [1].

Наиболее точная корреляция между линейными потерями энергии (ЛПЭ) частицы и энергией сфокусированного лазерного импульса для конкретного типа ПП и ИС может быть получена с помощью калибровки результатов лазерных испытаний путем дополнительного облучения в ионном пучке. Однако, с ростом степени интеграции, уменьшением проектных норм, и увеличением числа слоев металлизации современных ИС такой подход может давать значительную погрешность, связанную с большим различием коэффициента неионизационных потерь лазерного излучения для различных областей кристалла ИС.

В данной работе описана предложенная авторами методика исследования радиационной стойкости ПП и ИС к ОРЭ, не требующая калибровки на ионах, получившая название «локальной». Сущность данной методики заключается в способе лазерного облучения образца, расположенного, не в фокальной плоскости лазерного пучка, а на некотором расстоянии от этой плоскости, где пучок увеличивается в диаметре и становится расходящимся, что вызывает частичное проникновение света в активную область, несмотря на наличие многослойной металлизации, n+/p+ приповерхностных слоев, областей поликремния и т.п. В предположении однофотонного поглощения лазерного излучения, соотношение между энергией лазерного импульса и сгенерированным неравновесным зарядом в чувствительном объеме определяется путем прецизионного измерения амплитуды и формы электрического отклика в цепи питания ИС, что дает возможность учесть неоднородность оптических потерь по всему кристаллу. Такой подход может применяться при облучении как со стороны активного слоя, так и со стороны подложки.

Следует отметить, что для наиболее корректного применения описанной методики необходимо обеспечить максимально равномерное поглощение лазерного излучения в чувствительном объеме ИС, что накладывает определенные ограничения на используемую длину волны. Так, в случае облучения со стороны подложки, рабочая длина волны лежит в диапазоне 0,95...1,08 мкм; при облучении со стороны активного слоя в некоторых случаях длина волны может быть короче указанных значений. Справедливость локальной методики была многократно подтверждена сравнением полученных с помощью данного подхода результатов с результатами облучения сфокусированным пучком, откалиброванными по ионам.

Список литературы

1. Маврицкий О.Б. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. №5. С.5.

С.Ю. САБАЙДАШ, А.П. БОЙЧЕНКО, О.Н. ШИШКАНОВ
Кубанский государственный университет, Краснодар

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИХРОМНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТОВ НА ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ИЗ ЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Путем химической технологии преобразования частиц серебра продемонстрирована возможность полихромного (цветового) выделения оптических градиентов на примере электрополевых изображений, сформированных на черно-белой фотопленке «Agfa» для рентгенографии. Показаны особенности такой технологии для названного фотоматериала в сильных восстановителях на примере дихлорида олова.

S.Yu. SABAYDASH, A.P. BOYCHENKO, O.N. SHISHKANOV
Kuban State University, Krasnodar

TECHNOLOGY OF POLYCHROMOUS DISTRIBUTION OPTICAL GRADIENTS ON ELECTROPOLE IMAGES FROM SILVER PARTICLES

By the chemical technology of transformation of silver particles the possibility of polychromatic (color) extraction of optical gradients is demonstrated using the example of electric field images formed on black and white «Agfa» photographic film for radiography. The features of this technology for these photomaterial in strong reducing agents are shown using the example of tin dichloride.

Ранее в [1] нами была показана возможность химического преобразования геометрии частиц серебра (Ag), сформированных неоднородным электрическим полем в галогенсеребряном фотоматериале. Благодаря чему частицы металла приобретали оптическую активность (обладали определенной спектрально-отражательной способностью) и на электрополевых изображениях (ЭПИ) удавалось выделять различной цветовой гаммой участки с градиентами распределения напряженности электрического поля. Настоящая статья посвящена результатам дальнейших исследований в этом направлении с использованием раствора сильного восстановителя на основе дихлорида олова.

Разнополярные ЭПИ полусферического электрода получались в пятикратной повторности на рентгеновской фотопленке «Agfa» в условиях и режимах химико-фотографической обработки, описанных в

[2]. После чего фотоматериал с изображениями погружался на 180 секунд в отбеливающий раствор №1, а затем, после промывки дистиллированной водой, на такое же время в восстанавливающий раствор №2. Их состав приведен в таблице, а на рис. 1 – ЭПИ, полученные при увеличении в 10 раз в отраженном свете.

Состав обрабатывающих растворов

Обрабатывающий раствор и его состав		Содержание в одном литре воды, грамм
№1	Калий гексацианоферрат (III)	100
	Калий гидроокись	40
	Бензотриазол	0,1
№2	Олово двухлористое	3,0
	Натрий гидроокись	30

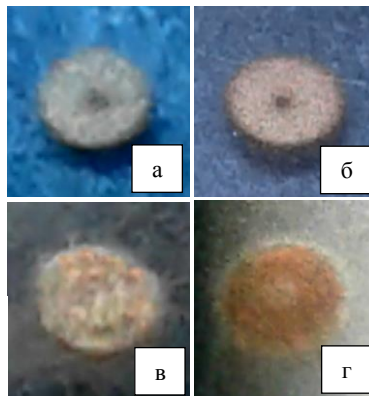


Рис. 1. ЭПИ отрицательной (а, в) и положительной (б, г) полярности; а, б – исходные ЭПИ; в, г – полихромные

На основе результатов работы сделаны следующие предварительные выводы. Полихромные ЭПИ отрицательной полярности почти по всей площади имеют оливково-зеленый оттенок с повышенной оптической плотностью D внутреннего и внешнего колец, ограничивающих центральное, которое содержит бесформенные желто-оранжевые фрагменты по всей ширине (рис. 1в). Более структурированы и богаты цветовой гаммой «положительные» ЭПИ. Их внешние границы окрашены в оливково-зеленый цвет, внутренний круг, соответствующий контакту с электродом, – в желто-зеленый, а центральное кольцо отражает свет в желто-оранжевой области спектра (рис. 1г). Кроме восстанавливающих свойств раствор №2 обладает и усиливающим исходную D у ЭПИ. Благодаря чему усиливается спектрально-отражательная способность Ag-частиц, что расширяет возможности описанной технологии.

Список литературы

1. Сабайдаш С.Ю., Шишканов О.Н., Бойченко А.П. Получение оптически активных кластеров серебра и полихромных изображений электрического поля на их основе // Матер. научно-практич. конфер. студентов и аспирантов физико-технического факультета КубГУ. Краснодар: ФГБОУ ВО «КубГУ», 2017. С.80-86.
2. Шишканов О.Н., Бойченко А.П., Яковенко Н.А. Химико-фотографические исследования процессов электрополевой коалесценции атомов серебра в микрокристаллах его галогенидов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2015. №2. С.89-100.

Ш.М. ИСМАИЛОВ^{1,2}, В.Г. КАМЕНЕВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва

РЕГИСТРАЦИЯ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ КЛИНОВИДНЫХ ОБРАЗЦОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЧАСТИЦЫ КОРУНДА

В данной статье представлены результаты исследования когерентного обратного рассеяния (КОР) на частицах корунда. Была разработана система регистрации КОР с перестраиваемой динамической кюветой. В ходе эксперимента была определена транспортная длина свободного пробега по ширине пика углового профиля интенсивности сигнала КОР и получены новые научные данные о профилях КОР от случайно-неоднородных сред.

Sh.M. ISMAILOV^{1,2}, V.G. KAMENEV²

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

REGISTRATION OF CBS EFFECTS FROM WEDGE-SHAPED SAMPLES CONTAINING PARTICLES OF ALUMINA

The paper looks at recent results of research dealing with a coherent backscattering (CBS) on the particles of alumina. It was developed a system of registration of CBS with a tunable dynamic sample. During the experiment, it was determined the transport length of the free mileage over the width of the peak of angular profile of signal intensity of CBS. Moreover, there were obtained a new scientific data about the CBS's profiles from randomly inhomogeneous environments.

Явление когерентного обратного рассеяния света состоит в резком возрастании интенсивности света, рассеянного сильно неоднородной средой, в малом телесном угле (порядка отношения длины волны к длине свободного пробега фотона) в направлении, противоположном направлению падения света [1].

Результаты измерений профиля когерентного обратного рассеяния от пылевого облака могут позволить решить задачу определения коэффициента рассеяния дисперсной среды и характерных размеров неоднородностей среды [2].

Недостатком большинства систем регистрации КОР является невозможность плавной регулировки толщины образца дисперсной среды.

Толщина образца регулируется с помощью изменения числа дискретных слоёв. Плавная регулировка толщины образца позволит обеспечить большую эффективность и информативность проводимых исследований и уточнить влияние дисперсной среды на пик когерентного рассеяния [3].

Была разработана и изготовлена динамическая кювета с плавной регулировкой толщины зондируемого слоя, позволяющая имитировать слои пыли с различной толщиной и концентрацией. На рис. 1а приведена схема экспериментальной установки для регистрации когерентного обратного рассеяния в дисперсных средах.

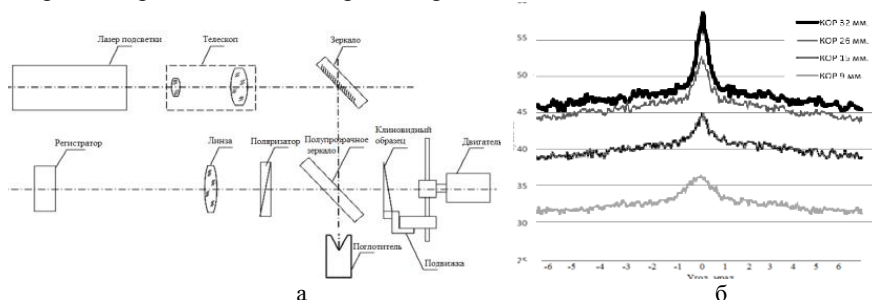


Рис. 1. Схема установки и анализ полученных данных: принципиальная оптическая схема установки (а), профиль КОР от частиц корунда Al_2O_3 диаметром 9 мкмс концентрацией 540 мг/см^3 (б)

Эксперименты проводились на клиновидном образце рыхлой среды 540 мг/см^3 . Шумы устранялись при помощи аксиального усреднения. После аксиального усреднения строились профили когерентного обратного рассеяния, рис. 1б. Форма профилей соответствует ожидаемой согласно теоретическим данным. По мере увеличения толщины среды фон и высота углового конуса возрастает, а отношение максимума пика к подложке стремится к насыщению. Для полученной экспериментальной зависимости производилась аппроксимация теоретической зависимостью в диффузионном приближении с помощью метода наименьших квадратов [4]. Результаты позволили получить новые научные данные о профилях когерентного обратного рассеяния от случайно-неоднородных сред.

Список литературы

1. Кузьмин В.Л., Романов В.П. // УФН. 1996. Т.166. №3.
2. Куратов С.Е., Кондратьев А.Н., Рогозкин Д.Б // НТО №70/34Т. ФГУП «ВНИИА им Н.Л. Духова». М.,2016.
3. Kroon D., Lönn S. Utilizing enhanced backscattering for determination of scattering properties in turbid media // LRAP-436.
4. van der Mark M. , van Albada M.P., Lagendijk A. // Phys. Rev. Lett. 1988. V.37. P.3575.

А.А. АДАМОВ, М.С. БАРАНОВ, В.Н. ХРАМОВ,
В.Л. АБДРАХМАНОВ¹, А.В. ГОЛУБЕВ¹, И.А. ЧЕЧЕТКИН¹

Волгоградский государственный университет

¹*Волгоградский государственный технический университет*

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ СВЕТОВЫХ МЕТОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОЛЩИНЫ РОГОВИЧНОГО СЛОЯ ГЛАЗА В МЕТОДЕ ЛАЗЕРНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Приведены результаты экспериментов по применению метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких прозрачных слоев в диапазоне от 1 до 0,1 мм. Указана схема повышения разрешения световых меток путем улучшения качества лазерного пучка. Проведена компьютерная обработка полученных изображений.

A.A. ADAMOV, M.S. BARANOV, V.N. KHRAMOV,
V.L. ABDRAKHMANOV¹, A.V. GOLUBEV¹, I.A. CHECHETKIN¹

Volgograd State University

¹*Volgograd State Technical University*

INCREASING THE AUTHORIZATION OF LIGHT METERS IN MEASUREMENT OF THE THICKNESS OF THE HORN-LENGTH OF THE EYE IN THE METHOD OF LASER TRIANGULATION

The results of experiments on the application of the laser triangulation method for measuring the thickness of thin transparent layers in the range from 1 mm to 0.1 mm are presented. The scheme of increasing the resolution of light marks by improving the quality of the laser beam is indicated. Computer processing of the received images is carried out.

Диапазон толщин прозрачных биологических тканей от 1 до 0,01 мм является проблемным с точки зрения проведения измерений, в частности, в офтальмологической практике в режиме реального времени при оперативном вмешательстве на передних тканях глаза. В работах [1, 2] нами уже была показана модификация метода лазерной триангуляции и возможность его использования для бесконтактного измерения роговичных слоев.

Целью данной работы является экспериментальное исследование повышения разрешения световых меток, используемых в предложенном

методе измерения. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Мы использовали полупроводниковый лазер (532 нм). В качестве модели роговицы глаза использовались пленки из полистирола, полипропилена и поливинилхлорида с различными показателями преломления соответствующими по значению роговице глаза.

Использование для формирования лазерного пучка с плоским волновым фронтом системы из собирающих, рассеивающих линз и диафрагм приводит к фокусировке на поверхности пленки световых меток с меньшим радиусом перетяжки в фокальной плоскости (рис. 2), что улучшает разрешение световых меток. Для пленки толщиной 0,10 мм уже не удается визуально разрешить две отдельные световые метки, хотя компьютерная обработка фотографии позволяет это осуществить (рис. 3). Пределом для визуального разрешения меток в нашем эксперименте стала толщина 0,23 мм.

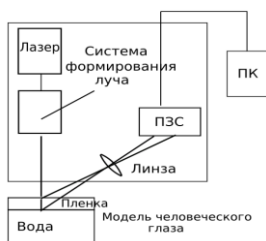


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

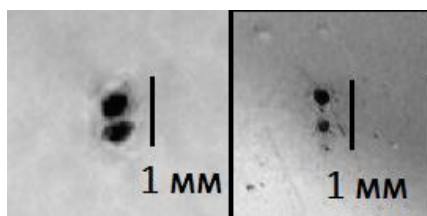


Рис. 2. Фотографии световых меток: слева без системы формирования луча, справа с системой

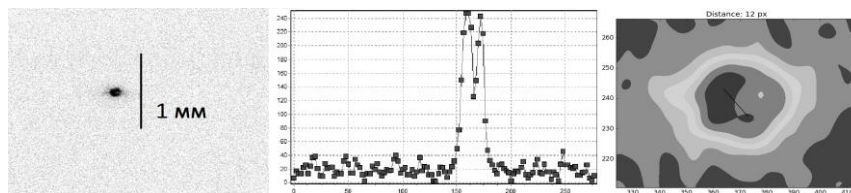


Рис. 3. Фотография и компьютерная обработка для пленки толщиной 0,10 мм

Список литературы

1. Адамов А.А., Храмов В.Н. Оценка возможности применения метода лазерной триангуляции к измерениям толщин тонких пленок // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2017. Т.20. №4. С.89-100.
2. Адамов А.А. Применение метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких биологических тканей // Материалы Научной сессии. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2017. С.454-459.

А.Ю. ПОТЛОВ, С.В. ФРОЛОВ, С.Г. ПРОСКУРИН

Тамбовский государственный технический университет

ДОПЛЕРОВСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Описан метод цветового доплеровского картирования одной выбранной скорости (ОСВ) в знакопеременных потоках биологических жидкостей с помощью оптической когерентной томографии. Представлены структурное и ОСВ-изображения для знакопеременного потока в фантоме кровеносного сосуда со сложной геометрией.

A.Yu. POTLOV, S.V. FROLOV, S.G. PROSKURIN

Tambov State Technical University

DOPPLER MAPPING OF BIOLOGICAL FLUIDS TURBULENT FLOWS USING OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY

A method of color Doppler mapping of one specific velocity (OSV) in bidirectional flows of biological fluids using optical coherence tomography is described. Structural and OSV images for a bidirectional flow in a phantom of a complex geometry blood vessel are presented.

Частичная или полная непроходимость глазных сосудов является первопричиной многих офтальмологических заболеваний. Например, при незрелой осложнённой катаракте максимальная линейная скорость кровотока в центральной артерии сетчатки составляет 63.3 ± 23.9 мм/с, а при норме 150.9 ± 25.5 мм/с, средняя линейная скорость кровотока 29.9 ± 4.7 мм/с (норма 345 ± 87.5 мм/с) [1]. При наличии возможности быстрого бесконтактного определения основных показателей внутриглазного кровотока [1-6] применительно к конкретному сосуду, диагностика и терапия глазных заболеваний могут быть подняты на более высокий уровень.

Целью данной работы является реализация метода цветового картирования одной выбранной скорости в знакопеременных потоках биологических жидкостей на основе оптической когерентной томографии.

Для достижения поставленной цели на основе низкокогерентных методов пространственной дискриминации оптического сигнала

разработан и применён метод цветового доплеровского картирования одной заранее выбранной скорости в турбулентном потоке. Предложенный метод реализован в виде программного продукта, который позволяет осуществлять картирование в автоматизированном режиме обработки интерференционного сигнала ОКТ-системы. Исходные данные разделяются на три части, соответствующие неподвижному объекту, положительно и отрицательно направленным потокам [4, 5]. Последующая независимая обработка приводит к формированию структурного [6] и двух изображений выбранной скорости, которые затем нормируются, кодируются и объединяются (комплексуются).

Результаты работы представленного метода для гидродинамического фантома кровеносного сосуда показаны на рис. 1. Гидродинамический фантом представлял собой изготовленный из прозрачных трубок наклонный капиллярный вход [4]. Вместо крови использовался однопроцентный раствор интралипида в воде [5].

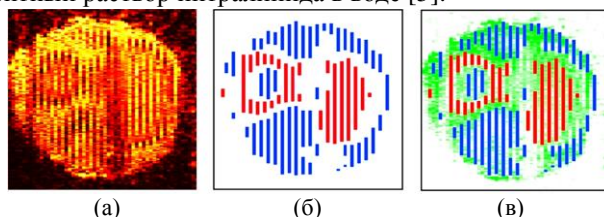


Рис. 1. Структурное ОКТ-изображение (а), ОСВ-изображение (б) и результат их комплексирования (в) для турбулентного потока в фантоме кровеносного сосуда со сложной геометрией

Применительно к биологическим объектам это позволяет получать в реальном времени анатомические карты выбранных скоростей в норме и патологии. Описанный метод можно применять не только в оптических, но и в ультразвуковых системах [4, 5].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-10327).

Список литературы

1. Philippakis E., Dupas B., et al. // *Retinal Cases and Brief Reports*. 2015. V.9 (4).P. 333.
2. Zimnyakov D.A., Tuchin V.V. // *Quantum Electronics*. 2002. V.32 (10). P.849.
3. Doronin A., Meglinski I. // *Laser & Photonics Reviews*. 2013. V.7 (1). P.797.
4. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. // *Journal of Biomedical Optics*. 2015. V.20 (5). P.051034.
5. Proskurin S.G., Potlov A.Yu., Frolov S.V. // *Quantum Electronics*. 2014. V.44 (1). P.54.
6. Frolov S.V., Potlov A.Yu., Petrov D.A., Proskurin S.G. // *Quantum Electronics*. 2017. V.47 (4). P.347.

А.А. ПОДЛЕСНЫХ¹, О.Т. КАМЕНЕВ^{1,2}, Ю.С. ПЕТРОВ²

¹*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

²*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗВЕТВИТЕЛЯ 3×3 В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ДЕФОРМОМЕТРЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Создан макет установки волоконно-оптического деформометра на основе интерферометра Маха-Цендера с использованием разветвителя 3×3. Проведены экспериментальные исследования по регистрации гармонических деформационных воздействий на чувствительный элемент деформометра. Показана возможность применения разветвителя 3×3 в волоконно-оптических деформометрах для регистрации продольных колебаний исследуемых объектов.

A.A. PODLESNYKH¹, O.T. KAMENEV^{1,2}, Yu.S. PETROV²

¹*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

²*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

APPLICATION OF 3X3 COUPLER BASED FIBER MACH-ZENDER INTERFEROMETER IN STRAIN SENSOR

A model of strain sensor based on fiber Mach-Zender interferometer using 3x3 coupler were created. Harmonic deformation signal detection tests are carried out. The possibility of using 3x3 fiber coupler in fiber based strain sensors for detection of longitudinal vibrations in test objects are shown

Удобной для применения в волоконно-оптических деформометрах является оптическая схема интерферометра Маха-Цендера [1], обеспечивающая возможность регистрации деформаций до 10^{-12} м. Однако, высокая чувствительность интерферометра приводит к дрейфу его рабочей точки, вызванному изменениями условий окружающей среды, например, температуры и давления. Эта проблема может быть решена путем использования пассивных методов обработки выходного сигнала с применением разветвителя 3×3 [2].

Целью работы является построение волоконно-оптического деформометра без использования цепи обратной связи с фазовым модулятором, применяемой для стабилизации рабочей точки интерферометра. В таком деформометре интерференция опорной и

сигнальной волн осуществляется в разветвителе 3×3 (рис. 1), на выходах которого формируются сигналы, фазы которых сдвинуты относительно друг друга на 120° . Обработка этих сигналов по методу, описанному в [3], обеспечивает возможность восстановления деформационного воздействия.

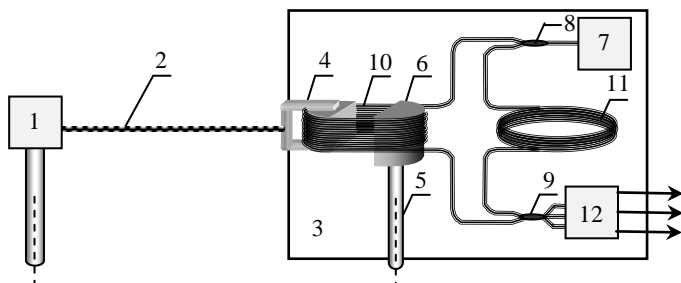


Рис. 1. Функциональная схема длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера:
 1 – стойка для крепления троса, 2 – трос, 3 – герметичный корпус, 4 – подвижная половина цилиндра, 5 – стойка, 6 – жестко закрепленная половина цилиндра, 7 – полупроводниковый лазер, 8 – Y-разветвитель, 9 – разветвитель 3×3 , 10 – волоконный световод измерительного плеча, 11 – волоконный световод опорного плеча, 12 – фотоприемник

На рис. 2 представлен сигнал воздействия на волоконно-оптический деформометр с разветвителем 3×3 (а) и результат его восстановления на выходе деформометра (б).

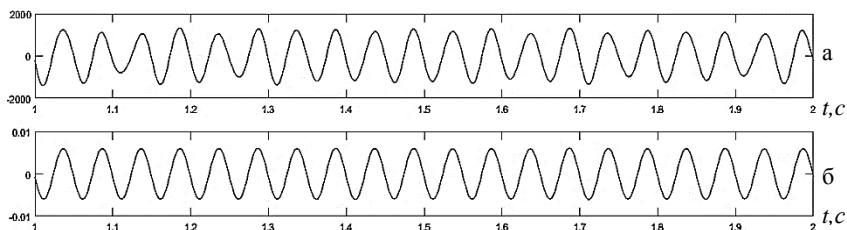


Рис. 2. Изображение сигнала, подаваемого на деформометр (а) и полученного в результате демодуляции (б)

Список литературы

1. Каменев О.Т., Кульчин Ю.Н. и др. // Письма в ЖТФ, 2014, Т.40(3). С.49-56.
2. Koo K.P., Tveten A.B., Dandridge A. // Appl. Phys. Lett. 1982. V.41(7). P.616-618.
3. Her S.-C., Yang C.-M. // Sensors. 2012. V.12(3). P3314-3326.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН

Акционерное общество «Московский завод «Сапфир»

МИНИАТЮРНЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассматривается миниатюрный тепловизионный прибор (ТВП) на основе широкоформатной микроболометрической матрицы фотодетекторов для применения на беспилотном летательном аппарате. Описаны основные параметры ТВП.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN

Joint Stock Company Moskovskij Zavod "Saphir"

MINIATURE THERMAL IMAGER FOR UNMANNED LETTERING APPARATUS

Is considered a miniature thermal apparatus (RTA) based on large format microbolometer array of photodetectors for use on unmanned aircraft. Described the main parameters of the TVP.

В настоящее время широко используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для определения очагов лесных пожаров, поиска пострадавших, экологического контроля местности, разведки и боевых действий с воздуха [1]. Для решения этих задач БПЛА должен быть оснащен миниатюрным тепловизионным прибором (ТВП), обладающим предельно малой массой, энергопотреблением, круглосуточностью и всепогодностью работы [2]. Блок-схема такого ТВП дана на рис. 1. Инфракрасный (ИК) объектив 1 имеет фокусное расстояние 10 мм, относительное отверстие 1:1, угол поля зрения 100°, рабочую область спектра 8–12 мкм. Он создает ИК тепловое изображение на микроболометрической матрице (МБМ) фотодетекторов 2 с числом пикселей 1024x1024, размерами пикселя 25x25 мкм, рабочей областью спектра 8–12 мкм, удельной обнаружительной способностью 10 Вт см Гц. Видеоусилитель 3 усиливает сигнал с МБМ 2 и передает его в радиопередатчик 4. Тот с помощью антенны 5 передает сигнал дистанционно. Все элементы 1–5 установлены на гиросtabilизированной платформе, монтируемой на БПЛА. Наземная приемо-передающая аппаратура 7 воспринимает сигнал с борта БПЛА. Приемо-передающая антенна 8 воспринимает сигнал и передает его в

приемо-передатчик 9. Сигнал с его выхода усиливается в блоке 10 обработки сигналов, где вычитаются шумы, повышается контрастность изображения и его чистота, после чего поступает в ТВ монитор 11. С его экрана оператор наблюдает изображение. Блок 7 представляет собой следящую систему, непрерывно отслеживающую положение БПЛА по максимуму радиосигнала, поступающего с блока 9. Для управления полетом и режимом работы БПЛА служит программируемый пульт 12 управления. Платформа 6 предназначена для двухосной стабилизации положения оптической оси ТВП. Она выполнена на базе инерциальной системы стабилизации изображения [3], обладающей минимальной массой и не требующей электрического питания. Масса ТВП вместе с платформой не превышает 1 кг, энергопотребление - не более 5 Вт при питании от батареи на 9 В. Масса приемо-передающего блока 7 не превышает 15 кг, его энергопотребление – не более 35 Вт при питании от батареи на 12 В. Дальность распознавания в ТВП цели типа грузовая автомашина (борт) составляет не менее 5 км при круглосуточной и всепогодной работе. Угол поля зрения ТВП (рис. 2) составляет 100°, время непрерывной работы – не менее 4 часов.

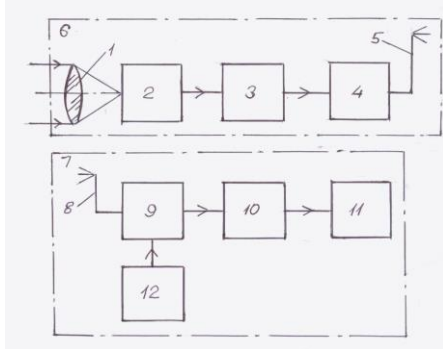


Рис. 1. Блок-схема ТВП для БПЛА

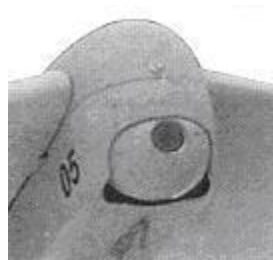


Рис. 2. ТВП на борту БПЛА

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.
2. Волков В.Г. Миниатюрные тепловизионные приборы для спецтехники // Спецтехника и связь. 2016. №3. С.2-13.
3. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: Техносфера. 2014.

А.А. АБРАМОВА¹, В.В. ГАВРУШКО, А.А. САПОЖНИКОВ
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
¹ОАО «Планета ОКБ», Великий Новгород

ДВУХЦВЕТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 0,4 – 2,3 мкм

Приведены спектральные характеристики двухцветных фотоприемников на основе кремния и соединения InGaAsSb. Определена зависимость отношения сигналов двух каналов от температуры излучателя в диапазоне 1500 – 6000 К.

А.А. ABRAMOVA¹, V.V. GAVRUSHKO, A.A. SAPOZHNIKOV
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University
¹OJSC "Planeta-OKB", Veliky Novgorod

THE TWO-COLOR PHOTODETECTOR FOR THE SPECTRAL RANGE OF 0.4 – 2.3 μm

Spectral characteristics of two-color photodetectors based on silicon and InGaAsSb compounds are presented. The dependence of the ratio of the signals of two channels on the emitter temperature in the range 1500 – 6000 K is determined.

Двухцветные фотоприемники дают возможность регистрировать оптическое излучение одновременно в двух разнесенных спектральных диапазонах. Это позволяет осуществлять идентификацию излучающих объектов, повышает вероятность обнаружения целей и снижает вероятность принятия ложных решений.

Во многих случаях конструкция и типы фотоприемников определяются технологическими возможностями их изготовления. В данной работе обсуждается использование удобного для технологического воплощения, варианта неохлаждаемых двухцветных фотоприемников на основе кремния и твердого полупроводникового раствора InGaAsSb. Для повышения селективности спектральной характеристики длинноволнового канала освещение производилось через подложку GaSb, которая выполняла роль эффективного абсорбционного фильтра. На рис. 1 приведены спектральные характеристики фотоприемников. Диапазон спектральной чувствительности первого канала составлял 0,4 - 1,1 мкм, а второго 1,8 - 2,3 мкм. В качестве примера рассматривалась целесообразность применения такого фотоприемника в качестве датчика пламени (пожарного извещателя).

Были рассчитаны и проверены экспериментально зависимости отношения сигналов фотоприемников от температуры теплового источника в диапазоне от 1500 до 6000 К. В качестве источника излучения была использована кварцевая лампа накаливания и прямое солнечное излучение. На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные результаты. Как видно, наблюдалось неплохое согласие рассчитанных и измеренных результатов. Отношение сигналов для вероятной температуры пламени (1500 К) превышало 300 крат по сравнению с солнечным излучением и более 30 крат для ламп накаливания (3000 К). Таким образом, исследованные двухцветные фотоприемники позволяют по отношению сигналов надежно отличать источники возгорания от вероятных помех (лампы накаливания, солнечные блики) и могут быть рекомендованы для использования в пламенных пожарных извещателях и других аналогичных целях.

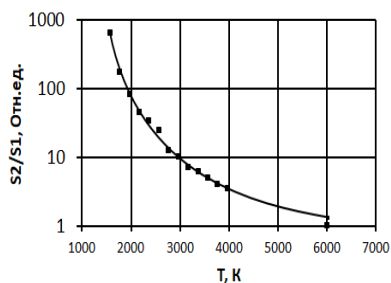
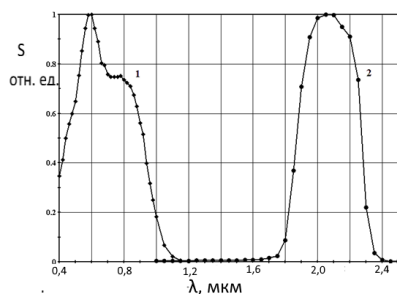


Рис. 1. Спектральная чувствительность Рис. 2. Отношение сигналов каналов 2 и 1

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН

Акционерное общество «Московский завод «Сапфир»

ВИДЕОКАМЕРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Рассматривается устройство видеокамеры для контроля в ультрафиолетовой области спектра для криминалистики, неразрушающего контроля скрытых дефектов, для контроля радиационной обстановки и высоковольтных линий электропередач. Приведены основные параметры видеокамеры.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN

Joint Stock Company Moskovskij Zavod "Saphir"

VIDEO CAMERA FOR MONITORING IN THE ULTRAVIOLET REGION OF THE SPECTRUM

Seen video camera device for monitoring in the ultraviolet region of the spectrum for forensics, non-destructive testing of hidden defects, for radiation monitoring of high-voltage lines etc. the basic parameters of the camera.

В настоящее время видеокамеры используются в науке и технике для наблюдения и видеозаписи в интересах охраны, технологического и экологического контроля, для МВД, ФСБ, МЧС, др. [1]. При этом все более важную роль играет работа в ультрафиолетовой (УФ) области спектра в особенности для контроля радиационной обстановки и высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и др. Нужно оценить визуально, где сосредоточено радиационное заражение и в каком объеме. Нужно видеть коронный разряд, возникающий в высоковольтных ЛЭП и говорящий об их неисправности. Обычные видеокамеры не решают эти задачи. Поэтому предлагается комбинированная видеокамера (см. блок-схему на рис. 1), для визуального наблюдения как радиационного фона, так и коронного разряда. Объектив 1 концентрирует излучение от объекта наблюдения и фона в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области спектра (0,4 – 1,1 мкм), проходящее через 1-е дихроичное зеркало 2 и создает изображение на матрицы ПЗС ТВ камеры 3. Видеосигнал с ее выхода усиливается в видеоусилителе 4 и с его выхода передается в ТВ монитор 5. В видеоусилитель 4 подается сигнал, с информацией о символах, нужных для их наблюдения с экрана ТВ монитора 5. Этот сигнал подается от генератора символов 6 и микшируется с основным

видеосигналом в видеоусилителе 4. При этом УФ объектив 7 создает изображение люминисцирующего в УФ области спектра зараженного радиацией пространства или коронного разряда, видимого в УФ области спектра $0,12 - 0,36$ мкм в ЭОП 8 типа «Сапфир-2» [2]. ЭОП 8 преобразует УФ изображение в видимое и усиливает его по яркости. Изображение с экрана ЭОП 8 с помощью оптики переноса 9, плоского зеркала 10 и отражающей в УФ области спектра поверхности зеркала 2 переносится на матрицу ПЗС ТВ камеры 3. В ней микшируется изображения объекта наблюдения и фона с изображением с экрана ЭОП 8. При пониженном уровне естественной освещенности уменьшается уровень выходного сигнала с ТВ камеры 3. Этот сигнал поступает в пороговое устройство 11. При недопустимо низком уровне сигнала устройство 11 срабатывает и запускает драйверы 12 и 16. Драйвер 12 обеспечивает питание ИК светодиода 13, излучающего на длине волны $0,9$ мкм. Это излучение проходит через 2-е дихроичное зеркало 14, охватывается объективом 15 формирования излучения (ОФИ), коллимируется и направляется на объект наблюдения, подсвечивая его. Одновременно драйвер 16 обеспечивает питание УФ светодиода 17, излучающего на длине волны $0,35$ мкм [3]. Это излучение отражается от 2-го дихроичного зеркала 14, коллимируется с помощью ОФИ 15 и подсвечивает радиоактивное облако или верхние части опор ЛЭП. Питание обеспечивается от напряжения 9 В. На рис. 2 представлен внешний вид видеокамеры.

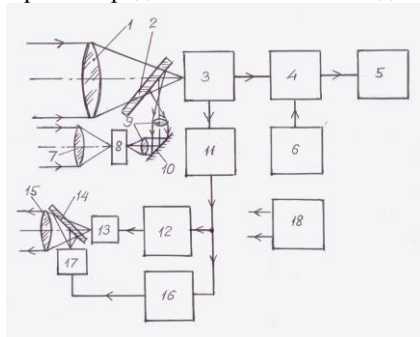


Рис. 1. Блок-схема видеокамеры



Рис. 2. Внешний вид прибора

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.
2. ЭОП «Сапфир-2» с ультрафиолетовым фотокатодом. Проспект фирмы Баспик, Владикавказ, 2016.
3. Коган Л.М., Колесников А.А., Туркин А.Н. Новые мощные ультрафиолетовые и фиолетовые излучающие диоды //Светотехника. 2016. № 2. С.57-59.

М.С. БЫЛИНА, С.Ф. ГЛАГОЛЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича***СРАВНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ЛАВИННЫМ
ФОТОДИОДОМ И С ОПТИЧЕСКИМ УСИЛИТЕЛЕМ**

В работе проведен анализ фотоприемных устройств (ФПУ) с лавинным фотодиодом (ЛФД) и предварительным оптическим усилителем (ОУ). Выполнена оценка обнаружительных способностей ФПУ для сигналов с бинарной амплитудной и фазовой модуляцией.

M.S. BYLINA, S.F. GLAGOLEV

*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications***A COMPARISON OF THE LIMITS
OF THE PHOTODETECTOR DEVICE WITH AVALANCHE
PHOTODIODE AND OPTICAL AMPLIFIER**

In the work the analysis of photo-detector device with avalanche photodiode and with advanced optical amplifier. The detection ability of the photo-detector device for signals with binary amplitude and phase modulation is estimated.

Для оценки качества ФПУ использовался Q -фактор [1, 2] $Q \approx (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) / (\sigma_0 + \sigma_1)$, где \bar{s}_1 и \bar{s}_0 – средние количества фотоэлектронов фотоприемника (ФП) при приеме логической «1» и логического «0», а σ_1 и σ_0 их среднеквадратические отклонения (СКО). Значение Q -фактора однозначно связано с вероятностью ошибки p_e , например для $Q = 6$, $p_e = 10^{-9}$. В анализе ФПУ с ЛФД он характеризовался квантовой эффективностью η , коэффициентом лавинного умножения M , отношением коэффициентов ионизации дырок и электронов $k_\alpha = \alpha_p / \alpha_n$. Показано, что для высокоскоростных волоконно-оптических систем связи (ВОСС) темновым током ЛФД можно пренебречь. Поэтому учитывались дробовые шумы, шумы лавины и шумы усилителя фототока (УФТ). Все сигналы и шумы в ФПУ оценивались количествами фотоэлектронов [2]. Шумы УФТ оценивались дисперсией количества шумовых электронов $(\sigma_q)^2$. Получено выражение для оптимальной величины коэффициента лавинного умножения $\bar{M}_{opt} = \sqrt{1 + (\sigma_q - 3) / (3 \cdot k_\alpha)}$ и обнаружительной

способности ФПУ, т.е. минимальное среднее количество фотоэлектронов, необходимое для обеспечения заданного значения Q (рис. 1).

$$\bar{m}_a = 0.5 \cdot (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) = Q \cdot (\sigma_q / \bar{M}) + 0.5 \cdot Q^2 \cdot F(\bar{M})$$

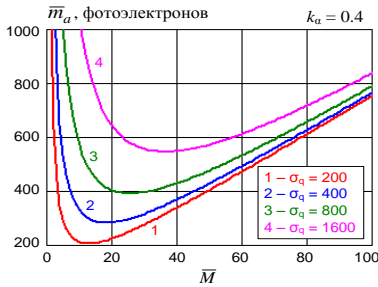


Рис. 1. Зависимость $\bar{m}_a(\bar{M})$ при $Q = 6$

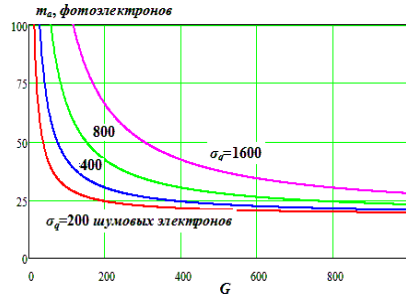


Рис. 2. Зависимость $\bar{m}_a(G)$ при $Q = 6$

В анализе ФПУ с предварительным ОУ он характеризовался коэффициентом усиления G , шум фактором F_n , скоростью передачи B и полосой пропускания $\Delta\nu$. Учитывались шумы усиленного спонтанного излучения (УСИ), дробовые шумы p-i-n фотодиода и шумы усилителя фототока (УФТ). Для обнаружительной способности ФПУ с предварительным ОУ и линейным трактом из n усилительных участков получено выражение $\bar{m}_a = 0.5 \cdot (\bar{s}_1 - \bar{s}_0) = Q^2 / 2 + Q \cdot \sigma_0 / G$,

где $\sigma_0 = \sqrt{\sigma_q^2 + \sigma_{sp}^2} = \sqrt{\sigma_q^2 + \eta \cdot (G-1) \cdot n \cdot F_n \cdot \Delta\nu / B}$ – СКО количества фотоэлектронов при приеме логического «0». На рис. 2 приведены результаты расчетов при $F_n = 4$, $\Delta\nu/B = 5$, $\eta = 0.8$, $n = 1$.

Полученные результаты показывают, что при малом уровне шума УФТ $\sigma_q^2 \rightarrow 0$ обнаружительная способность ФПУ с ОУ минимальна и составляет $\bar{m}_a = Q^2 / 2$, т.е. равна 18 фотоэлектронов при $Q = 6$. Для ФПУ с ЛФД $\bar{m}_a = 0.5 \cdot Q^2 \cdot F(\bar{M})$, т.е. больше 18 фотоэлектронов, так, как $F(\bar{M})$ всегда больше 2 даже для лучших ЛФД [2].

Список литературы

1. Листвин В.Н., Трешиков В.Н. DWDM системы: научное издание. М.: Издательский дом «Наука», 2013.
2. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Учебное пособие. В 2 т. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.

Е.В. КАЛАШНИКОВ, В.С. МИЛОВИДОВ, А.В. ЧАРУХЧЕВ
*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПО ЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯМ НА ДИСПЛЕЕ

В работе описан способ определения параметров объекта по его изображению на экране дисплея. Способ повышает быстродействие и точность юстировочных процедур лазерных пучков на объектах с зеркальными метками, так как дистанционные измерения предложенным способом являются независимыми от расположения матричного фотоприемника и объекта в широком диапазоне изменений дистанции до объекта.

Ye.V. KALASHIKOV, V.S. MILOVIDOV, A.V. CHARUKHCHEV
*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instruments Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region*

REMOTE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF AN OBJECT BY ITS IMAGE ON DISPLAY

A method for estimation of parameters of an object by its image on display is presented in the work. The method enhances performance and accuracy of the laser beam adjustment at the objects with mirror marks, since the remote measurements made using the method are independent of the photodetector array and object arrangement in a wide range of variable distance up to the object.

Для ряда юстировочных задач необходимо на больших дистанциях проводить с достаточно высокой точностью измерения длины отрезков и других параметров на объекте заданной формы, например, на плоских гранях куба, тетраэдра и т.д. [1].

На дисплее видеоконтрольного устройства с матричным фотоприемником любые отрезки на объекте, (например, АВ, АС, ВС), преобразуются в соответствующие отрезки (А'В', А'С' и В'С'). Длина отрезков на экране дисплея может быть найдена через их координаты в системе координат плоского экрана $\{U, V\}$.

Для измерений реального объекта по его плоскому изображению необходимо определить масштаб, то есть цену деления одного пикселя изображения по координатам $\{U, V\}$, соответствующим реальным размерам объекта в пространстве предметов. Введенные для этого

коэффициенты масштабирования M по координатам позволяют сравнивать реальные отрезки с их изображениями на плоском экране.

Для отрезков на плоскости объекта, ортогональной оптической оси видеоконтрольного устройства, из условия $AB=(M)A'B'$ и $AC=(M)A'C'$ справедливы уравнения:

$$AB^2 = (X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2 = M_U(U_A - U_B)^2 + M_V(V_A - V_B)^2, (1)$$

$$AC^2 = (X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2 + (Z_A - Z_C)^2 = M_U(U_A - U_C)^2 + M_V(V_A - V_C)^2, (2)$$

где M_U и M_V – масштабирующие коэффициенты по координатам $\{U, V\}$.

Совместное решение этих уравнений (1) и (2) дает значения M_U и M_V , определяющие метрологическое соответствие между реальными размерами отрезков на объекте в пространстве предметов и его плоским изображением на экране дисплея видеоконтрольного устройства.

После определения значений M_U и M_V любой произвольный отрезок DP между произвольными точками на объекте можно определить как

$$DP^2 = M_U(U_D - U_P)^2 + M_V(V_D - V_P)^2. (3)$$

Для ориентации плоскости, в которой лежат измеряемые отрезки, ортогонально оптической оси видеоконтрольного устройства на грани куба могут быть нанесены зеркальные участки – метки, а видеоконтрольное устройство снабжено автоколлимационным каналом [2]. При этом координаты точек A , B и C отрезков AB и AC на плоской грани объекта в виде куба с ребром a в прямоугольной системе координат можно записать $A(X_A, a/2, Z_A)$, $B(X_B, a/2, Z_B)$, $C(X_C, a/2, Z_C)$, если начало системы координат совместить с центром куба. Координаты концов отрезка $D'P'$ на экране дисплея равны $D'(U_D, V_D)$, $P'(U_P, V_P)$.

Решение системы уравнений (1) и (2): $\Delta = (U_A - U_B)^2 (V_A - V_C)^2 - (V_A - V_B)^2 (U_A - U_C)^2$; $\Delta U = [(X_A - X_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2] (V_A - V_C)^2 - [X_A^2 + Z_A^2] (V_A - V_B)^2$, $\Delta V = (U_A - U_B)^2 [X_A^2 + Z_A^2] - (U_A - U_C)^2 [(X_A - X_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2]$ дает возможность найти $M_U = \Delta U / \Delta$ и $M_V = \Delta V / \Delta$.

Описанный способ при наличии возможности ориентировать плоскость объекта с помощью зеркальных меток повышает быстродействие и точность юстировочных процедур лазерных пучков на объектах. При этом дистанционные измерения являются независимыми от расположения матричного фотоприемника и объекта в широком диапазоне изменений дистанции до объекта и допускают автоматизацию процесса юстировки.

Список литературы

1. Патент РФ №2601505 от 10.11.2016.
2. Оптический журнал. 2014. Т.81. №9. С.46-51.

Н.М. СКОРНЯКОВА, О.А. ЕВТИХИЕВА
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ДВИЖУЩЕЙСЯ ЧАСТИЦЫ
НА ДОПЛЕРОВСКИЙ СИГНАЛ
В ПРИБЛИЖЕНИИ ГАУССОВА ПУЧКА**

Приведены результаты компьютерного и физического моделирования рассеяния гауссова пучка на движущихся одиночных частицах больших диаметров. Выявлены особенности доплеровского спектра, такие как, образование «подожки», расщепление доплеровского сигнала.

N.M. SKORNYAKOVA, O.A. EVTIKHIEVA
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

**INFLUENCE OF MOVING PARTICLES SIZE
ON THE DOPPLER SIGNAL
IN A GAUSSIAN BEAM APPROACH**

The results of computer simulation and physical experiment of the Gaussian beam scattering on the single moving large-diameter particles are presented. The features of the Doppler spectrum, such as creating "of the substrate", the splitting of the Doppler signal are investigated.

В большинстве оптических измерений в настоящее время применяется лазер как источник излучения. Однако у гауссовых пучков есть особенности рассеяния, которые могут оказать большое влияние на получаемые результаты.

Если исследуемая частица является большой, то дифракционные картины в плоскости регистрации излучения перекрываются, интерферируя между собой. В результате этого, становится невозможным пренебрегать зависимостью спектра доплеровского сигнала от радиуса частицы, угла пересечения зондирующих пучков и положения фотоприемника. Промоделировано влияние на частоту доплеровского сигнала изменения размера частицы, размера гауссова пучка, угла пересечения зондирующих пучков и изменения координаты в плоскости регистрации рассеянного излучения. Получено, что во всех этих случаях наблюдается зависимость частоты доплеровского сигнала от приведенных параметров.

Когда большая частица движется через измерительный объем, гауссова форма лазерного пучка и временная зависимость угла рассеяния могут изменять параметры доплеровского сигнала, особенно если положение фотоприемника не оптимально (рис. 1 и 2). Это может привести к дополнительной ошибке измерения скорости большой частицы. Поэтому в этом случае интерпретация результатов исследования в двухфазных полидисперсионных потоках становится сложной. Определены условия, при которых влияние размера большой частицы на частоту доплеровского сигнала не существенно.

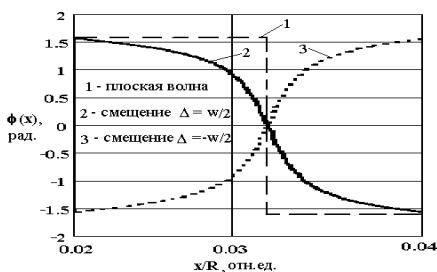


Рис. 1. Изменение фазы дифрагированного пучка в зависимости от радиуса частицы ($\phi_1 - x = x^3$, $\phi_2 - x = (x^3 - w)$, $\phi_3 - x = (x^3 + w)$), а – в мм

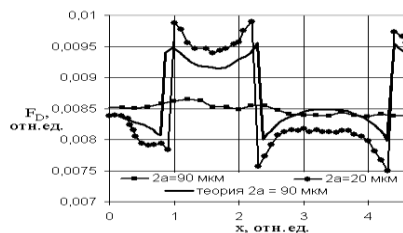


Рис. 2. Пример зависимости для фототока и спектра

Из проведенных компьютерных и физических экспериментов по рассеянию гауссовых пучков на движущейся частице в дифракционном приближении можно сделать следующие выводы:

1. При регистрации лазерного излучения, рассеянного движущейся частицей, неподвижным фотоприемником, происходит изменение угла рассеяния, что приводит к искажению регистрируемой индикатрисы рассеяния и нелинейному закону изменения фазы рассеянного излучения.

2. Наблюдаемые амплитудные особенности рассеяния гауссового пучка на движущейся частице оказывают большое влияние на точность измерений однопучковой и двухпучковой схем.

3. Проявляющиеся фазовые особенности оказывают влияние на методы лазерного доплеровского анемометра и анемометрии по изображениям частиц.

4. Исходя из выявленных особенностей рассеяния гауссова пучка на движущейся частице, предложен новый частотный метод измерения радиуса гауссова пучка.

В.И. БУСУРИН, М.А. ЖЕГЛОВ¹, П.В. МУЛИН,
К.А. КОРОБКОВ, Р.П. БУЛЫЧЕВ

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

¹АО «ГосНИИП», Москва

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАЛАНСИРОВКИ РЕЗОНАТОРА С ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ВОЛНОВОМ ГИРОСКОПЕ

Предложены решения, позволяющие минимизировать влияние расщепления частот в чувствительном элементе твердотельного волнового гироскопа. Предлагаются алгоритмы определения дефектной частоты на основе обработки сигналов датчиков перемещения и формирования компенсационных воздействий с помощью электродов, что обеспечивает уменьшение «ухода» гироскопических измерительных систем.

V.I. BUSURIN, M.A. ZHEGLOV¹, P.V. MULIN,
K.A. KOROBKOV, R.P. BULYCHEV

Moscow aviation institute (national research university)

¹JSC «GosNIIP», Moscow

PROVISION OF BALANCING A RESONATOR WITH AN AXISYMMETRIC STRUCTURE IN A SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE

Solutions that minimize the effect of frequency splitting in the sensitive element of a solid-state wave gyroscope are proposed. Algorithms for extracting a defective frequency based on processing of the signal of the displacement sensors and forming compensatory impacts by the electrodes, what reduce the "escape" of the gyroscopic measuring systems.

Твердотельным волновым гироскопам (ТВГ) присущи высокая точность и надежность, обусловленная отсутствием деталей, подверженных износу. Осевая симметрия конструкции резонатора обеспечивает устойчивость измерений к влияниям компонент вращения в ортогональных направлениях. Эти качества делают их очень подходящими для длительного и непрерывного режима эксплуатации. Длительная безотказная работа ТВГ с полусферическим резонатором делает это направление очень перспективным для дальнейшего развития.

Кварцевый резонатор является чувствительным элементом (ЧЭ) ТВГ. В миниатюрных конструкциях ЧЭ ТВГ может возникнуть неоднородность распределения массы, обусловленная производственными допусками, которая нарушает динамику и вносит наибольшую погрешность измерений [1]. Также погрешности ТВГ могут быть связаны с вибрациями основания, дефектами систем возбуждения резонатора и неточностями монтажа электродов съёма. Эти факторы могут стать причиной расщепления собственной частоты резонатора.

Резонатор может иметь осесимметричную структуру. В этом случае идеальная динамическая модель ТВГ может быть описана при помощи двух гармонических осцилляторов, оказывающих взаимное влияние друг на друга при возникновении угловой скорости вращения гироскопа, связанного с объектом. Для балансировки резонатора может быть использован метод формирования компенсационных воздействий на электродах возбуждения. Для этого необходимо производить анализ огибающей выходного сигнала гироскопа, которая связана с дефектной частотой. Для выделения огибающей предлагается использовать алгоритм с цифровой фильтрацией выходных сигналов датчиков перемещения. Для синтеза фильтра производится расчёт его параметров при помощи теоремы Котельникова. Значение амплитуды выходного сигнала гироскопа возводится в квадрат, а затем подаётся на вход фильтра нижних частот. Из выходного сигнала фильтра извлекается квадратный корень. Путём дальнейших преобразований определяется частота дефектной составляющей сигнала.

Для случая, когда фильтр не может быть синтезирован, разработан алгоритм для выделения огибающей, который исследует набегающий и спадающий фронты высокочастотной составляющей сигналов датчиков перемещения и определяет точки экстремума «быстрого» сигнала. После чего, в моменты экстремумов, происходит получение значений. Эти значения соответствуют точкам огибающей, которые после интерполяции позволяют получить её график. На основе анализа огибающей сигнала, рассчитывается угол, по которому определяется соответствующий электрод возбуждения, а также амплитуда корректирующего сигнала, подаваемого на него. Использование данного способа балансировки резонатора позволяет уменьшить скорость «ухода», что повышает точностные характеристики твердотельных волновых гироскопов.

Список литературы

1. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014.

О.А. ЕВТИХИЕВА, С.М. КАИНГ, Б.С. РИНКЕВИЧЮС
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

РЕФРАКЦИЯ ПЛОСКОГО ОПТИЧЕСКОГО ПУЧКА В ПРОЗРАЧНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Приведена схема рефрактографической оптической системы и результаты экспериментальной визуализации рефрактограмм плоского пучка для исследований тепловых пристеночных процессов около нагретых тел в воде.

O.A. EVTIKHIEVA, SOE MIN KHAING, B.S. RINKEVICHYUS
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

REFRACTION OF THE FLAT OPTICAL BEAM IN A TRANSPARENT HETEROGENEOUS ENVIRONMENT

The scheme of refractographic optical system and the results of the experimental visualization refractograms flat beam for studies of near-wall thermal processes around heated bodies in the water.

Для экспериментального исследования физических процессов в жидкостях широко используется метод оптической рефрактографии, заключающийся в зондировании исследуемой среды структурированным когерентным оптическим излучением и цифровой регистрацией параметров прошедшего излучения [1]. Визуализация рефракционных картин, является основополагающим методом исследования при проведении количественной диагностики оптически неоднородных прозрачных сред.

Оптическая рефрактография обладает всеми преимуществами, свойственными оптическим измерениям. Данный метод является количественным интегральным методом, применимым к исследованию прозрачных стационарных и нестационарных сред. Визуализация неоднородностей на основе плоского оптического пучка позволяет исследовать тонкие пограничные слои жидкости около нагретых тел и осуществлять количественную диагностику оптически неоднородных сред в условиях сильной рефракции.

На рис. 1 приведена схема оптической рефрактографической системы. Излучение из оптического модуля 1, в виде плоского пучка, направляется в кювету с водой 2 снизу нагретого тела 3, установленного на юстировочном столике 4. На экране 5 наблюдается рефрактограмма,

которая фотографируется цифровым фотоаппаратом 6 и обрабатывается на компьютере 7 для определения процесса остывания нагретых тел.

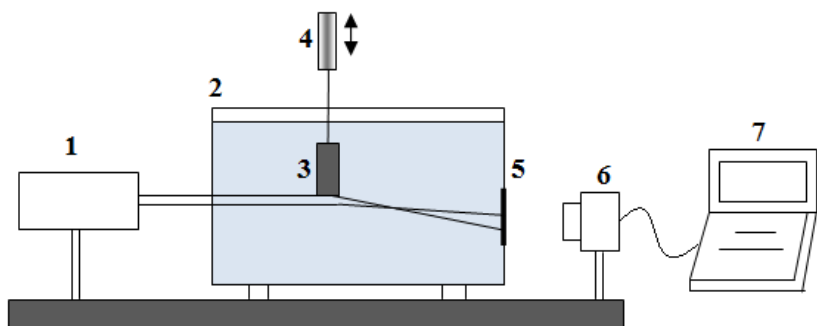


Рис. 1. Схема оптической рефрактографической системы: 1 – оптический модуль, 2 – кювета с водой, 3 – тепловой элемент, 4 – юстировочный столик, 5 – экран, 6 – цифровой фотоаппарат, 7 – компьютер

В установке используется источник излучения с мощностью 5 мВт. Длина волны излучения равна 0,53 мкм. Расстояние от металлического элемента до экрана 18 см. Элемент нагревается до температуры 90 °С и опускается в кювету с водой, температура которой была 20 °С. Температура теплового элемента измеряется термопарой. На рис. 2 показаны экспериментальные рефрактограммы плоского оптического пучка, полученные на экране 5 в различные моменты времени, что позволяет определить временной процесс остывания нагретых тел.

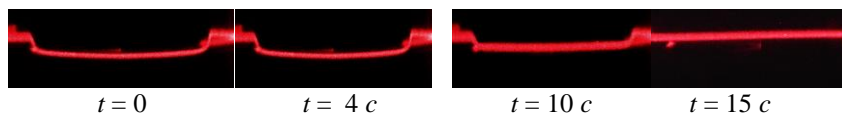


Рис. 2. Рефракционные картины для визуализации распределения температуры в различных моменты времени

Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008.
2. Evtikhieva O.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Laser refractography. NY: Springer, 2010.
3. Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. // Научная визуализация. 2016. Т.8. №4. С.50-66.

В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, П.В. МУЛИН,
А.Т. ФАМ, В.Х. ДАНГ

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

РАЗРАБОТКА РАМОЧНОГО МОЭМ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Исследована модель рамочного микроопто-электромеханического (МОЭМ) преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов на основе интерферометра Фабри-Перо (ИФП), обеспечивающего квазилинейную функцию преобразования с высокой чувствительностью. Произведено моделирование характеристик МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов на основе ИФП.

V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, P.V. MULIN,
A.T. PHAM, V.Kh. DANG

Moscow Aviation Institute (National Research University)

DEVELOPMENT OF THE FRAME-TYPE ANGULAR VELOCITY MOEM-TRANSDUCER WITH SIGNAL OPTICAL READING ON BASE OF FABRY-PEROT INTERFEROMETER

The article considered model of frame-type optical micro-electromechanical (MOEM) angular velocity transducer with output signal optical reading on base of the Fabry-Perot interferometer (FPI), which provides quasi-linear transfer function with high sensitivity. The modeling of characteristics for frame-type MOEM angular velocity transducer with output signal optical reading on base of the FPI is shown.

Измерение малых угловых скоростей с высокой чувствительностью возможно осуществить с помощью рамочного МОЭМ-преобразователя [1], который может быть построен на основе упругого воспринимающего элемента (ВЭ) и высокочувствительной схемы оптического считывания информации (СОС). ВЭ выполнен в виде рамки, у которой колебательное движение обеспечивается с помощью пьезо-биморфных элементов. За счет эффекта Кориолиса происходит преобразование измеряемой угловой скорости в микро-перемещение, регистрируемое с помощью СОС, которая состоит из источника излучения, волоконно-оптического

ответвителя, ИФП с коллимирующей оптикой, фотоприемников. Вышедшие из ИФП оптические сигналы, зависящие от измеряемой угловой скорости Ω , регистрируются фотоприемниками и обрабатываются в схеме цифровой обработки. Такое решение позволяет развязать цепи возбуждения ВЭ со схемой цифровой обработки. Это обеспечивается помехозащищенное считывание с цифровым выходом информации и уменьшается погрешность, обусловленную изменением конструктивных параметров МОЭМ-преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием выходных сигналов на основе ИФП при повышенных температурах [2]. Произведено численное моделирование функции преобразования исследуемого МОЭМ-преобразователя угловых скоростей (рис. 1).

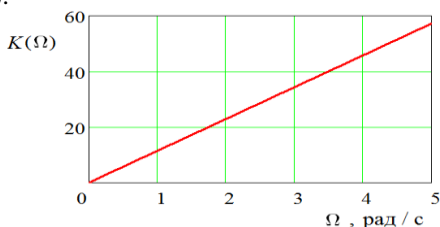


Рис. 1. Зависимости изменения числа пиков пропускания $K(\Omega)$ ИФП на выходе БО от угловой скорости Ω в диапазоне измерения ± 5 рад/с при использовании ИФП с энергетическим коэффициентом отражения $R = 0,9$

Предлагаемый рамочный МОЭМ-преобразователь угловых скоростей с применением оптического интерферометрического считывания имеет квазилинейную зависимость функции преобразования в расчетном диапазоне угловой скорости ± 5 рад/с.

В диапазоне температур от -50 до $+80$ °С максимальное вызванное температурой смещение фазового набега составляет менее 0,01 %. Определено допустимое изменение квазимонохроматического оптического излучения около $1,1 \cdot 10^{-3}$ мкм при угловых скоростях до 5 рад/с с обеспечению погрешности измерения не более 1 %. Результаты моделирования показали возможность построения малогабаритного помехозащищенного измерительного устройства для применения в системах управления и навигации подвижных объектов.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447).

Список литературы

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007.
2. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В., Дьячков В.В. // Датчики и Системы. 2017. №5. С.37-43.

Ю.В. ИВАНОВА, К.М. ЛАПИЦКИЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ТЕНЕВЫМ ФОНОВЫМ МЕТОДОМ

В работе описаны алгоритмы обработки цифровых изображений, полученных теневым фоновым методом, с целью корректировки вносимых при их регистрации искажений. В качестве примеров приведены алгоритмы коррекции дисторсии, поворота, смещения и других видов искажений исходных изображений. Показано, что использование разработанных алгоритмов позволяет компенсировать влияние искажений и тем самым повысить эффективность работы теневого фонового метода.

Yu. V. IVANOVA, K. M. LAPITSKIY

National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

THE DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR DISTORTION CORRECTION OF DIGITAL IMAGES OBTAINED BY BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD

The paper describes the algorithms for digital images processing obtained by background oriented schlieren method for the adjustment made in respect of the recording distortion. For example the algorithms for distortion, rotation, offsets and other deformations of the original images correction are considered. It is shown that the developed algorithms using allows to compensate the influence of deformation and thereby improve the efficiency of the background oriented schlieren method.

Теневой фоновый метод (ТФМ) применяется для обнаружения неоднородностей в оптически прозрачных средах, а также недостатков различных отражающих поверхностей. В состав установки ТФМ входит компьютер, цифровая видеокамера, источник возмущений, фоновый экран с нанесенной на него определенной структурой (например, точки, расположенные в хаотическом порядке), а также лампа для подсветки экрана. Структурированный экран расположен за объектом исследования, видеокамера служит для регистрации изображения экрана. В результате эксперимента получают два изображения: в отсутствии неоднородности и при ее наличии. При этом области изображения, на пути которых не оказалось неоднородностей, не должны исказиться. В процессе

регистрации изображений различные паразитные факторы могут приводить к дополнительным искажениям даже при отсутствии неоднородностей. Таким образом, возникает задача разделения двух типов искажений изображений.

В предложенном алгоритме наличие и величина искажений изображения определяются по положению и форме изначально прямоугольной метки, которая наносится дополнительно на фоновый экран перед регистрацией. Разработаны алгоритмы компенсации смещений и поворота изображения на основе аффинных преобразований. Данные алгоритмы позволяют проводить поиск метки при различных уровнях засветки путем повышения контрастности изображения.

На рис. 1 показана иллюстрация работы описанных алгоритмов.

На основе полиномиальной модели [1] произведен поиск коэффициентов, связывающих координаты нескольких опорных точек на двух изображениях. Затем проводилось преобразование координат всех пикселей искаженного изображения, после чего преобразованное изображение сравнивалось с исходным. Отмечено появление на преобразованном изображении артефактов – областей с некорректной яркостью пикселей.

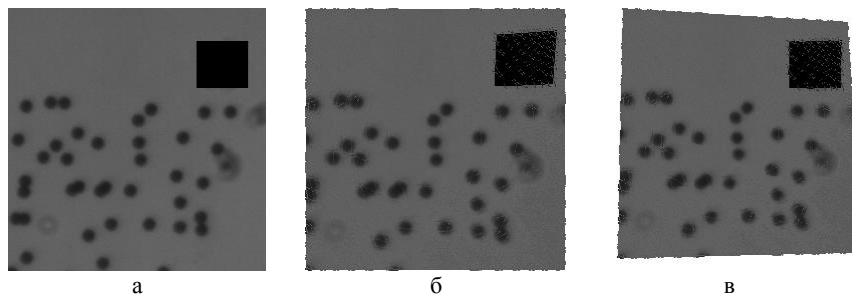


Рис. 1. Пример коррекции изображения: исходное изображение (а), подвергнутое искажениям (б), исправленное (в)

Список литературы

1. Poroikov A.Yu., Boden F., Kirmse T., Rinkevichyus B.S., Skornyakova N.M., Shashkova I.A. Accuracy of Measurement of Dynamic Surface Deformations by the Image Pattern Correlation Technique // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. V.50. No.5. P.474-481.

И.А. ШЕВКУНОВ^{1,2}, Н.В. ПЕТРОВ¹, В.Я. КАТКОВНИК²¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург²Технологический университет Тампере, Финляндия

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ ПИКСЕЛЬНОЕ СУПЕРРАЗРЕШЕНИЕ В БЕЗЛИНЗОВОЙ ОСЕВОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Представлен метод безлинзовой осевой цифровой голографии с модуляцией фазовых масок в объектной плоскости. Моделированием продемонстрировано высокоточное восстановление с разрешением, превышающим размер пикселя сенсора в 32 раза.

I.A. SHEVKUNOV^{1,2}, N.V. PETROV¹, V.Ya. KATKOVNIK²¹ITMO University, Saint-Petersburg²Tampere University of Technology, Finland

COMPUTATIONAL PIXEL SUPER-RESOLUTION IN LENSLESS IN-LINE DIGITAL HOLOGRAPHY

Lensless in-line digital holography is considered with a random phase masks modulation at the object plane. It is shown by computational experiments that high-accuracy reconstructions can be achieved with resolution going up to super-resolution with a factor of 32 with respect to the sensor pixel size

Предложенный метод пиксельного суперразрешения в безлинзовой осевой цифровой голографии реализуется в простой схеме с минимальным количеством оптических элементов (рис. 1). Основным элементом схемы является пространственно-временной модулятор света (ПВМС), использующийся для задания фазовых масок, которые приводят к модуляции объектного волнового фронта. ПВМС расположен перед объектом. ПВМС и сенсор – дискретные матричные приборы с квадратными пиксели, размерами $\Delta_{\text{ПВМС}} \times \Delta_{\text{ПВМС}}$ и $\Delta_{\text{С}} \times \Delta_{\text{С}}$ для ПВМС и сенсора, соответственно. В цифровых технологиях непрерывные объекты разбиваются на вычислительные пиксели с размерами $\Delta_{\text{В}} \times \Delta_{\text{В}}$. Данная дискретизация необходима как для цифровой обработки данных, так и для моделирования распространения и формирования изображений. Противоположно пикселям ПВМС и сенсора, вычислительные пиксели не ограничены физически и могут быть выбраны относительно малого размера. Традиционно размер вычислительно пикселя выбирается равным размеру пикселя сенсора, $\Delta_{\text{В}} = \Delta_{\text{С}}$. Но в предложенном методе мы выбрали размер $\Delta_{\text{В}} < \Delta_{\text{С}}$, что приводит к случаю суперразрешения, которое

достигается за счёт подачи на ПВМС набора из N фазовых масок, моделирующих объектный волновой фронт [1]. Таким образом, производится запись N различных голограмм и их итеративное восстановление. Параметры моделирования: $\lambda = 417$ нм, $\Delta_C = 9$ мкм, $\Delta_{\text{ПВМС}} = 9$ мкм. Расстояние между плоскостями объекта и сенсора равно 1 мм. В данном эксперименте фазовый объект «оператор» также, как и фазовые маски, задавался в плоскости ПВМС, результаты приведены на рис. 2. Размер вычислительного пикселя $\Delta_B = 0.28$ мкм. Это значит, что параметр пиксельного суперразрешения (отношение пикселя сенсора к вычислительному) $R = 32$.

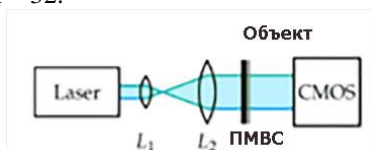


Рис. 1. Оптическая схема метода:

Laser – источник излучения, L_1, L_2 - колирующая система линз, CMOS - сенсор



Рис. 2. Результат восстановления объекта: верхний ряд – восстановленная фаза (слева) и оригинальная фаза (справа); нижний ряд – продольные сечения фаз (слева) и график зависимости средней квадратичной ошибки в зависимости от номера итерации (справа)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект No3.1893.2017/4.6, и Horizon 2020 TWINN-2015, grant 687328 - HOLO.

Список литературы

1. Katkovnik V., et.al. // Optica. 2017. V.4(7). P.786.

Г.И. ГАРНАЕВА, Л.А. НЕФЕДЬЕВ,
Э.И. ХАКИМЗЯНОВА, Е.Н. АХМЕДШИНА
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ В ЭХО-ГОЛОГРАФИИ

Рассмотрена фильтрация оптических сигналов и преобразование информации с использованием стимулированной эхо-голографии в случае, когда ее возбуждение происходит с использованием объектного лазерного импульса, несущего информацию и импульса, выполняющего роль частотного фильтра. Показано, что форма отклика стимулированной эхо-голограммы зависит от длительности, амплитуды, площади и временной структуры возбуждающих импульсов.

G.I. GARNAEVA, L.A. NEFEDIEV,
E.I. HAKIMZAYNOVA, E.N. AKHMEDSHINA
Kazan Federal University

THE FREQUENCY-TEMPORAL FILTERING OF SIGNALS IN THE ECHO HOLOGRAPHY

The filtering the optical signals and converting the information using a stimulated echo holography in the case when the excitation occurs with the use of the object laser pulse carrying information and laser pulse performing the role of a frequency filter was considered. It is shown that the temporal form of the stimulated echo hologram depends on the duration, amplitude, area, and temporal structure of excitatory laser pulses.

В работе [1] был проведен анализ операций с использованием стимулированной эхо-голографии (СЭГ) при которых: осуществляется управление задержкой сигналов, их запоминание, реализуются корреляции и свертки, обеспечивающие работу управляемых согласованных фильтров и получение взаимно- и автокорреляционных функций сигналов. Рассмотрен общий алгоритм преобразования оптических сигналов [2, 3] и возможность выполнения преобразования Фурье в условиях, когда в качестве третьего импульса используется когерентный сигнал с линейной частотной модуляцией.

Степень преобразования временной формы отклика стимулированной эхо-голограммы (СЭГ) зависит от параметров возбуждающих лазерных импульсов. В работе рассмотрено влияние частотной фильтрации при

изменении длительности объектного импульса, его амплитуды, площади и временной структуры на частотно-временную структуру отклика СЭГ.

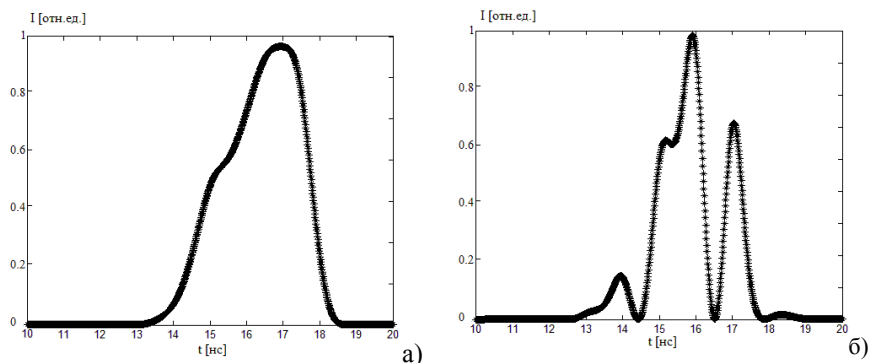


Рис. 1. Временная форма отклика стимулированной эхо-голограммы получающаяся в результате фильтрации объектного импульса: объектный импульс: $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 2$ нс, $I_{11} = 1$ отн.ед., $I_{12} = 0,5$ отн.ед., $\theta_1 = 0,01\pi$; импульс-фильтр: $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 3,5$ нс, $I_{22} = 1$ отн.ед., $I_{21} = 0,5$ отн.ед., $\theta_2 = 0,01\pi$ (а); объектный импульс: $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 2$ нс, $I_{11} = 1$ отн.ед., $I_{12} = 0,5$ отн.ед., $\theta_1 = 1\pi$; импульс-фильтр: $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 2$ нс, $I_{22} = 1$ отн.ед., $I_{21} = 0,5$ отн.ед., $\theta_2 = 1\pi$ (б)

Из анализа рис. 1 следует, что при выборе первого лазерного импульса в роли объектного импульса, а второго лазерного импульса в роли импульса-фильтра, временная форма отклика СЭГ зависит от соотношения длительностей, амплитуд, площадей и временных структур возбуждающего импульса и импульса-фильтра.

При увеличении длительности или площади объектного импульса искажается форма отклика, что является следствием неполного воспроизведения фурье-компонент объектного лазерного импульса в отклике.

Список литературы

1. Устинов В.Б., Ковалевский М.М., Баруздин С.А. // Известия АН СССР. Серия физ. 1986. Т.50. №8. С.1459-1499.
2. Гарнаева Г.И., Нефедьев Л.А., Ахмедшина Е.Н., Хакимзянова Э.И. // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т.81. №6. С.856-860.
3. Гарнаева Г.И., Нефедьев Л.А., Хакимзянова Э.И., Яхин Т.Р. // Оптический журнал. 2014. Т.81. В.6. С.3-8.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ
ИНВАРИАНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО КОРРЕЛЯТОРА
ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ
МОДУЛЯЦИИ АМПЛИТУДНОГО ПВМС**

В работе приведены результаты моделирования работы инвариантного оптического коррелятора при наличии дополнительной фазовой модуляции, вносимой амплитудным ЖК ПВМС. Приведены дискриминационные и вероятностные характеристики распознавания объектов при отсутствии и при наличии фазового сдвига у изображений распознаваемых объектов. Предложен метод оптимизации с целью уменьшения вероятности ошибки распознавания и приведены характеристики распознавания объектов после оптимизации.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

**MATHEMATICAL MODELING OF THE WORK
OF THE INVARIANT OPTICAL CORRELATOR
WITH THE ADDITIONAL PHASE MODULATION
OF THE AMPLITUDE SLM**

The results of modeling of the working of the invariant optical correlator with the additional phase modulation introduced by the amplitude LC SLM are presented. Discriminatory and probabilistic characteristics of pattern recognition in the absence and in the presence of a phase shift in images of recognized objects are presented. An optimization method is proposed to reduce the probability of recognition error and the characteristics of object recognition after optimization are presented.

В инвариантных оптических корреляторах амплитудный ЖК ПВМС используется в качестве устройства ввода распознаваемых изображений. Так как амплитудные ЖК ПВМС также производят дополнительную фазовую модуляцию светового пучка [1], необходимо оценить влияние дополнительной фазовой модуляции на характер распознавания изображений. Для этого было проведено математическое моделирование с использованием измеренной ранее зависимости дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС от величины поданного на него сигнала [1].

Моделирование было проведено в следующих условиях. Рассмотрены «идеальный» случай при отсутствии дополнительной фазовой модуляции и «реальный» случай при наличии фазового сдвига при выводе изображений распознаваемых объектов на ЖК ПВМС. Для моделирования использовался корреляционный фильтр ОТ МАСН [2]. Распознаваемыми объектами являются наборы изображений танков T72, Abrams, Chieftain, Leopard. Вероятность ошибки распознавания в «идеальном» случае составила $1.5 \cdot 10^{-5} \%$; в «реальном» случае вероятность ошибки распознавания составила $4.9 \cdot 10^{-3} \%$.

С целью уменьшения возникающей ошибки распознавания был предложен метод оптимизации корреляционного фильтра. Этот метод заключается в том, что корреляционный фильтр синтезируется из изображений, учитывающий фазовый сдвиг, возникающий при выводе изображений на ЖК ПВМС. На рис. 1 представлены дискриминационные характеристики распознавания изображений после оптимизации корреляционного фильтра. Вероятность ошибки в этом случае – $10^{-5} \%$.

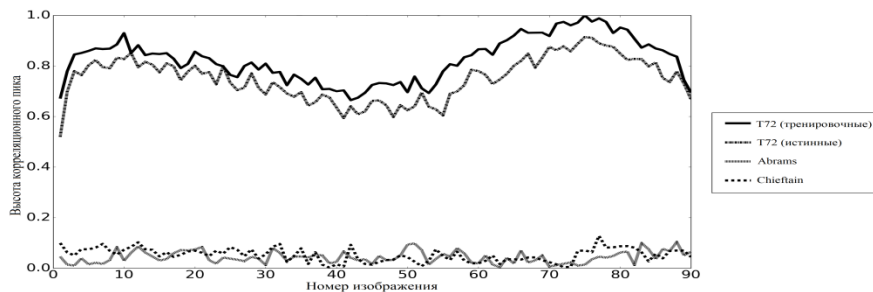


Рис. 1. Дискриминационные характеристики после оптимизации

Предложенный метод оптимизации был проверен на корреляционных фильтрах двух типов для нескольких различных наборов распознаваемых изображений. Во всех случаях наблюдается значительное уменьшение вероятности ошибки распознавания, за счет того, что при синтезе корреляционного фильтра было учтено наличие дополнительной фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС.

Список литературы

1. Гончаров Д.С., Краснов В.В., Пономарев Н.М., Стариков Р.С.. Измерение характеристик фазовой модуляции амплитудного ЖК ПВМС двухлучевым интерферометрическим методом // VI международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
2. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition // Cambridge University Press, 2005.

М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯТОРА СОВМЕСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования коррелятора совместного преобразования с жидкокристаллическим пространственным модулятором на входе. Проведено сравнение работы коррелятора при амплитудной и фазовой модуляции и при различных методах обработки совместного спектра, частично исследованных ранее методами математического моделирования. Предложен и исследован простой метод нелинейной обработки совместного спектра – ограничение его интенсивности с помощью фотоприемника.

M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

EXPERIMENTAL RESEARCH OF JOINT TRANSFORM CORRELATOR

The report presents the results of an experimental research of joint transformation correlator with liquid crystal spatial modulator input. Comparison of correlator operation with amplitude and phase modulation and with various methods of joint spectrum processing, partially researched earlier by mathematical modeling methods, is performed. A simple method of non-linear processing of joint spectrum is proposed and investigated - limiting its intensity with photodetector.

Коррелятор совместного преобразования (КСП) является одним из перспективных устройств для систем распознавания образов [1, 2]. Для улучшения характеристик КСП предлагались методы изменения совместного спектра: бинаризация, ограничение по порогу, специальная амплитудная модуляция, блокирование постоянной составляющей и другие [3-6]. Представленные методы в основном были направлены на усиление высокочастотных составляющих в спектре, использовался также чисто фазовый ввод входных сигналов в коррелятор.

Экспериментальные исследования КСП проводились нами с использованием действующего макета фурье-процессора с устройством ввода на основе жидкокристаллической (ЖК) матрицы от видеопроектора [7].

Исследования показали, что нелинейная обработка интенсивности совместного спектра позволяет улучшить параметры КСП: величину корреляционных максимумов, их локализацию, отношение сигнал-шум и дискриминационную способность коррелятора. Нами проводилось экспериментальное сравнение методов нелинейной обработки совместного спектра, предложенных ранее, и метода ограничения интенсивности спектра фотоприемником. Этот метод позволяет более просто реализовать нелинейную обработку, которая не требует дополнительных временных затрат на вычисление в компьютере или применения дополнительных устройств модуляции света, а результаты его оказываются не хуже, чем у предложенных ранее методов.

Исследованный нами КСП с пространственным модулятором света на основе ЖК матрицы от видеопроектора позволяет работать как с амплитудной, так и с фазовой модуляцией на входе, для реализации фазовой модуляции достаточно на стадии записи совместного спектра изменить положение поляроидов на входе и выходе ЖК матрицы. При использовании фазовой модуляции нами было получено увеличение дискриминационной способности при распознавании изображений в случае линейного режима регистрации совместного спектра, что было предсказано ранее методами математического моделирования. Наши эксперименты показали, что при нелинейном режиме регистрации интенсивности совместного спектра, который позволяет улучшить характеристики КСП, как при амплитудной, так и при фазовой модуляции, преимущества фазовой модуляции незначительны (некоторое увеличение отношения сигнал-шум), что вызывает сомнения в целесообразности ее применения в КСП.

Список литературы

1. Alfalou A., Brosseau C. Understanding correlation techniques for face recognition: from basics to applications (19) // Face recognition / ed. by M. Oravec, 2009. P.353-380.
2. Alam M.S., Haque M., Khan J.F., Kettani H. Fringe-adjusted joint transform correlator based target detection and tracking in forward looking infrared image sequence // Opt. Eng. 2004. V.43(6). P.1407-1413.
3. Javidi B. Nonlinear Joint Power Spectrum Based Optical Correlation // Appl. Opt. 1989. V.28. P.2358-2367.
4. Kaewkasi P., Widjaja J., Uozumi J. Effects of threshold on single-target detection by using modified amplitude-modulated joint transform correlator // Opt. Commun. 2007. V.271. P.48-58.
5. Alin C. // Journ. Phys. 2008. V.53, No.1-2. P.57-63.
6. Lu G., Yu F.T.S. Performance of a phase-transformed input joint transform correlator // Appl. Opt. 1996. V.35. No.2. P.304-313.
7. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Оптический фурье-процессор с жидкокристаллическим устройством ввода информации // Оптический журнал. 2015. Т.82. №3. С.23-29.

О.А. ЕВТИХИЕВА, Н.М. СКОРНЯКОВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОМОЩЬЮ БЕССЕЛЕВА ПУЧКА

Приведены результаты компьютерного моделирования оптических систем создания бесселевых пучков специального вида, которые могут выступать в качестве дифракционного оптического элемента.

O.A. EVTIKHIEVA, N.M. SKORNYAKOVA

National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

MODELING OF THE DIFFRACTION OF OPTICAL ELEMENT WITH BESSEL BEAM

The results of computer simulation of optical systems for creating a special form Bessel beams that can act as a diffractive optical element are presented.

Бесселев пучок – это световой пучок, обладающий периодическими свойствами. Его поперечное распределение поля самовоспроизводится при распространении, т.е. он является модой. Бесселевы пучки описываются функцией Бесселя различных порядков, соответственно порядку Бесселевой моды. В среде MathCAD, в которой проводятся все расчеты, данная функция задается как решение дифференциального уравнения вида

$$x^2 \frac{d^2}{dx^2} y + x \frac{d}{dx} y + (x^2 - n^2) y = 0,$$

где n – нужный порядок функции Бесселя. В данной работе рассматриваются функции нулевого, первого и второго порядка первого рода: $J_0(r)$, $J_1(r)$, $J_2(r)$.

В среде MathCAD рассчитывается дифракция таких пучков на простейших препятствиях. В расчете используется дифракционный интеграл Френеля-Кирхгофа в приближении Фраунгофера (подразумевается, что дифракция наблюдается на большом расстоянии от препятствия). Параметры, определяющие фазовую функцию – период d и диаметр апертуры D (вне апертуры фазовая функция принимает значение ноль).

В нашем случае, если учесть, что источник излучения бесконечно удален от транспаранта, а плоскость наблюдения находится на фокусном расстоянии от транспаранта, одномерное распределение напряженности поля в ДК описывается выражением

$$E(x) = \frac{D}{2} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \exp(j\varphi(u)) \exp\left(-\frac{u^2}{w_0^2}\right) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{Z\lambda}(xu)\right\} du,$$

где $\varphi(u)$ – фазовая функция дифракционного аксикона, D – размер апертуры.

Полученные при расчете ДК (рис. 1 и 2) попадают под определение кольцевого Бесселева пучка. Рассмотрены закономерности изменения получаемого пучка при варьировании отношения размера перетяжки к размеру апертуры ДООЭ и при варьировании периода колец аксикона.

При уменьшении перетяжки радиус кольца практически не изменяется, при этом кольцо становится шире. При увеличении периода колец ДООЭ основное кольцо сжимается к центру, при практически неизменной его толщине. Также при увеличении периода малые по интенсивности кольца уменьшаются. То есть при больших периодах (и при малом количестве колец в апертуре ДООЭ) можно получать более качественные по профилю, достаточно узкие кольцевые Бесселевы пучки. Исследованы особенности дифракционных картин в зависимости от различных параметров. Получены численные значения методической погрешности, появляющейся при использовании приближения Бесселева пучка.

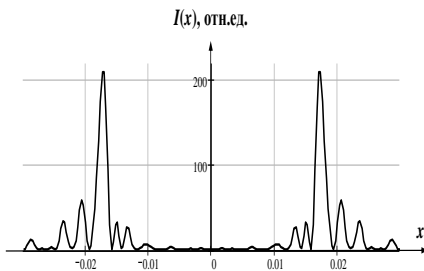


Рис. 1. Дифракционная картина для $d = 0,075$ мм

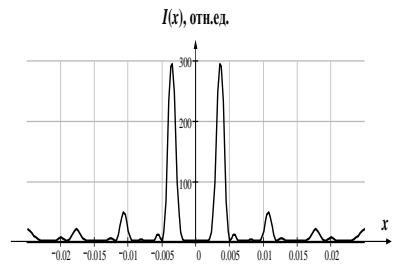


Рис. 2. Дифракционная картина для $d = 0,35$ мм

Список литературы

1. Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Сойфера М.: Физматлит, 2003.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

**МЕТОДИКА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ ОТДЕЛЬНОЙ
КОМПОНЕНТЫ СОСТАВНОГО ДИФРАКЦИОННОГО
ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА**

Разработана методика визуализации дефектов отдельной компоненты тонкого составного дифракционного оптического элемента, представляющего композицию тонкой подложки и пары совмещенных элементарных решеток.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala Grodno State University, Belarus

**METHOD VISUALIZATION OF THE DEFECTS
OF A SEPARATE COMPONENT OF A COMPOSITE
DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT**

The developed method of visualization of the defects of a separate component of the thin composite diffractive optical element has been demonstrated. This element represents a thin substrate composition and a pair of combined elementary gratings.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) нашли широкое применение в оптических и оптико-электронных устройствах. Наличие многомерной периодической структуры в виде композиции совмещенных в пространстве элементарных периодических структур сильно усложняет дифракционный спектр такого оптического элемента и, соответственно, затрудняет процедуру контроля. Для ДОЭ с совмещенной периодической структурой требуется выявить дефекты отдельной элементарной структуры и исключить влияние их на результат контроля других элементарных структур.

В данной работе предложена методика визуализации дефектов отдельной компоненты тонкого дифракционного оптического элемента, реализующая раздельную визуализацию дефектов, как подложек, так и самой структуры. Методика контроля основана на одновременной оптической обработке исследуемого и эталонного дифракционных оптических элементов с фильтрацией дифракционных порядков отверстиями в непрозрачном экране, установленном в задней фокальной

плоскости объектива, с использованием интерферометра Маха – Цендера [1].

Исследуемый ДОЭ представлял собой композицию подложки и нескольких совмещенных элементарных дифракционных решеток с взаимно перпендикулярной ориентацией штрихов постоянного периода.

Рассмотрены несколько схем, которые реализуют способы визуализации дефектов подложки и элементарной структуры ДОЭ.

Созданная методика визуализации дефектов элементарных дифракционных решеток, входящих в состав дифракционного оптического элемента, была экспериментально опробована. На рис. 1 представлены интерференционные картины, визуализирующие высокое качество первой элементарной решетки (а) и наличие дефекта второй элементарной решетки (б).

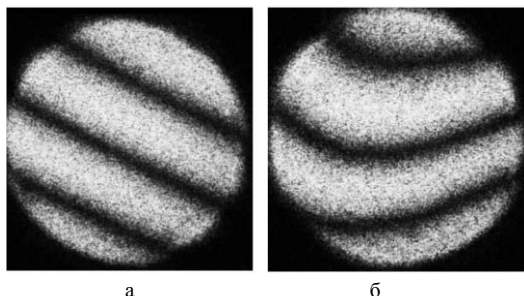


Рис. 1. Интерференционные картины, характеризующие качество первой (а) и второй (б) элементарных решеток

Таким образом, разработанная методика реализации измерительного контроля качества составного дифракционного элемента, позволяет визуализировать дефекты отдельной компоненты. Для расшифровки интерферограмм и получения количественной информации о величине дефектов использовались способы цифровой обработки интерферограмм с соответствующим программным обеспечением.

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // Проблемы физики, математики и техники. 2017. №3. С.7-13

Д.С. ГОНЧАРОВ, Д.Ю. МОЛОДЦОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ,
С.С. ПЬЯНКОВ, В.Г. РОДИН, Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОЗЕРКАЛЬНОГО ПВМС ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе представлен метод измерения профиля рабочей поверхности микрозеркального пространственно-временного модулятора света с помощью интерферометра Майкельсона.

D.S. GONCHAROV, D.Yu. MOLODTSOV, N.M. PONOMAREV,
S.S. PIANKOV, V.G. ROGIN, R.S. STARIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MEASURING OF PROFILE OF DMD SLM SURFACE BY INTERFEROMETRIC METHOD

The work describes the method to measure the profile of digital micromirror device's working surface by Michelson interferometer.

Микрозеркальный пространственно-временной модулятор света (МЗ ПВМС) – микроэлектромеханическое устройство, позволяющее производить бинарную амплитудную модуляцию света с высокой скоростью и высоким пространственным разрешением. Использование МЗ ПВМС в оптических системах, в частности, в оптическом корреляторе [1], позволяет добиться недостижимого иными методами быстродействия.

Для использования МЗ ПВМС во многих оптических системах необходимо знать, насколько велики отклонения формы рабочей поверхности модулятора от плоской [2]. Нарушение плоскостности поверхности приводит к появлению неравномерного фазового набега по сечению модулируемого пучка. Информация о плоскостности рабочей поверхности МЗ ПВМС необходима при разработке многих оптических систем для учёта и компенсации возникающих фазовых искажений.

В данной работе предложен метод измерения профиля рабочей поверхности МЗ ПВМС. Схема установки, представленная на рис. 1, основана на интерферометре Майкельсона. В качестве источника излучения используется неодимовый лазер с длиной волны 532,8 нм. В

одном из плеч интерферометра располагается плоское зеркало. В другом плече располагается плоское зеркало или МЗ ПВМС (в данной работе использовался модулятор Texas Instruments S1076-7402 XGA Digital Mirror Device). Интерференционные картины регистрировались фотокамерой PixeLink PL-B781F.

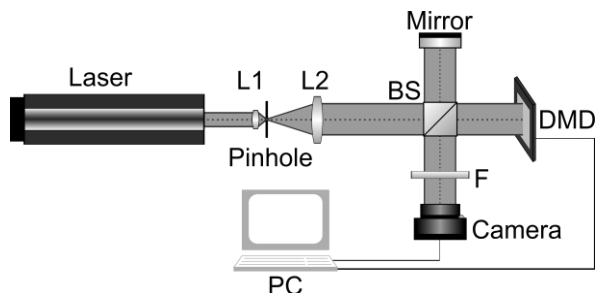


Рис. 1. Схема установки

Поочередное использование во втором плече интерферометра МЗ ПВМС и плоского зеркала необходимо для получения пространственных спектров интерференционных картин в случае исследуемого объекта (МЗ ПВМС) и эталонного объекта (зеркало, плоскостность которого значительно выше, чем у исследуемого объекта). Интерференционные полосы в случае исследуемого объекта оказываются искривленными по сравнению с эталонным объектом, а интерференционные спектральные компоненты в случае исследуемого объекта оказываются значительно более размытыми, нежели для эталонного объекта. Сравнивая пространственные спектры для эталонного и исследуемого объектов, можно судить о степени кривизны поверхности МЗ ПВМС.

Производя спектральную полосовую фильтрацию полученных интерференционных картин, можно определить разность фаз между интерферирующими пучками для обоих случаев. Из распределений разностей фаз в двух случаях получена величина фазовых искажений, связанных с неплоскостностью рабочей поверхности МЗ ПВМС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-07-00829.

Список литературы

1. Chao T.-H., et al. // Proc. SPIE. 2014. V.9094.
2. Molodtsov D.Yu., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.338-342.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПОДЛОЖЕК ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Предложена оптическая схема голографического интерферометра для работы в производственных условиях, реализован способ интерференционного контроля качества оптических элементов типа фазовая дифракционная решетка на прозрачной стеклянной подложке.

N.T. AVLASEVICH, A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

Janka Kupala Grodno State University, Belarus

QUALITY CONTROL OF TRANSPARENT SUBSTRATES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

The proposed optical scheme of the holographic interferometer for operation in a production environment, has implemented the method of interferometric quality control of optical elements of the phase type diffraction grating on a transparent glass substrate.

Для контроля качества различных оптических элементов в производственных условиях применение интерферометрии перспективно. Основное требование к оптическим интерференционным устройствам реализации контроля – это пониженная чувствительность к вибрациям и простота в обращении.

Для работы в производственных условиях предложена оптическая схема лазерного голографического интерферометра (рис. 1), которая позволяет реализовать способ интерференционного контроля качества дифракционных оптических элементов (ДОЭ) типа фазовая дифракционная решетка на прозрачной стеклянной подложке [1]. За основу голографического варианта лазерного интерферометра был выбран сдвиговой интерферометр, позволяющий осуществить большой боковой сдвиг, превышающий линейные размеры ДОЭ. Применение данного интерферометра, а также развязка его и ветви зондирующего светового пучка обеспечивает низкую чувствительность устройства к вибрациям.

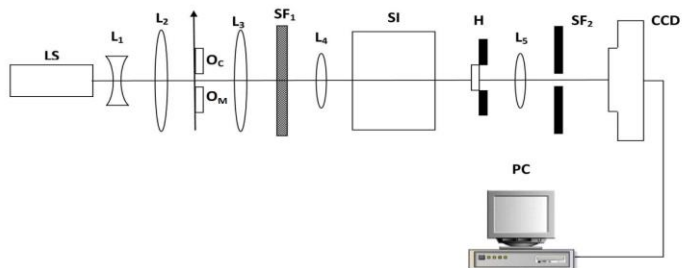


Рис. 1. Оптическая схема лазерного интерферометра:

LS - лазерный источник света; L_1 и L_2 - телескопическая система;
 O_C , O_M - положения эталонного и контролируемого ДОО; L_3 , L_4 , L_5 - объективы,
 SF_1 - непрозрачный экран с отверстием; SI - интерферометр бокового сдвига;
 H - эталонная голограмма; SF_2 - непрозрачный экран с отверстием;
 CCD - цифровая фотокамера; PC - персональный компьютер

На фотографиях (рис. 2) представлены интерференционные картины результата контроля качества подложек ДОО. Первые интерферограммы (рис. 2а и 2б) подтверждают соответствие подложек ДОО норме. На интерферограмме (рис. 2в) приведен результат контроля ДОО с подложкой, не соответствующей норме.

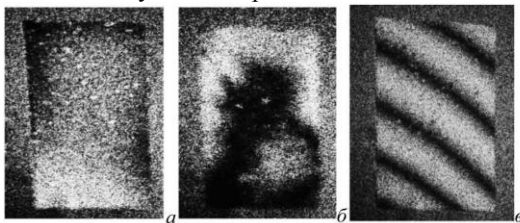


Рис. 2. Интерференционные картины отображающие результаты контроля качества подложек ДОО

Голографический интерферометр может быть дополнен системой автоматической обработки интерференционных картин. В этом случае для извлечения информации о соответствии ДОО норме используются соответствующие алгоритмы цифровой обработки интерферограмм.

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Буть А.И., Ляликов А.М. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. №2 С.34-40.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР,
Д.Р. ХАЗВАЛИЕВА¹

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

ПЕРЕНОС ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СО СЛОЕВ БИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА НА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТ

Показана возможность создания на подложках из полиметилметакрилата (ПММА) рельефно-фазовых голографических решеток с высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) около 25 % и максимальной глубиной поверхностного рельефа порядка 1 мкм с помощью переноса первоначально зарегистрированной на слоях бихромированного желатина (БХЖ) голографической структуры и методов обработки ПММА как резиста.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A. MAURER,
D.R. KHAZVALIEVA¹

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹ Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

HOLOGRAPHIC STRUCTURE TRANSFER FROM DICHROMATED GELATIN LAYERS TO A POLYMETHYLMETHACRYLATE SUBSTRATE

It is shown that it is possible to create holographic gratings with a high diffraction efficiency (DE) of about 25 % on polymethylmethacrylate (PMMA) substrates with a maximum depth of the surface relief of the order of 1 μm by transferring the holographic structure originally recorded on the layers of dichromated gelatin (DCG) with using the methods of processing the PMMA as a resist.

Обнаруженный эффект воздействия УФ-излучения на желатин в слоях БХЖ, приводящий к десятикратному увеличению высоты поверхностного рельефа в зарегистрированных на БХЖ голографических структурах [1] и к образованию окон прозрачности в слоях БХЖ при многократном повторении цикла «воздействие УФ излучения + промывка в воде» [2], позволил предположить возможность переноса структур через окна прозрачности на подложку из материала, чувствительного к УФ-излучению. На примере регистрации на БХЖ голографических решеток продемонстрировано появление на поверхности ПММА небольшого

поверхностного рельефа [2]. В отличие от слоев БХЖ, в которых фотодegradированные участки желатина вымываются водой, разрушенные УФ-излучением участки ПММА требуют специальных травящих составов – проявителей. В литографии для резистов на основе ПММА используется смесь «метилизобутилкетон (МИБК) + изопропанол» (1:3), чистый изопропанол, смесь «изопропанол + вода» (1:1), ацетон и др. [3, 4]. В работе [2] обработка подложки из ПММА в специальном проявителе отсутствовала, что не позволило получить высоту поверхностного рельефа более 0.18 мкм и величину средней ДЭ более 10 %. В настоящей работе на завершающей стадии эксперимента использовались все вышеперечисленные составы специальных проявителей для резистов на основе ПММА. Время проявления составляло 20 – 120 с. После операции проявления следовала промывка в двух ваннах чистого изопропанола.

Наилучшие результаты были получены при использовании проявителя МИБК, разбавленного изопропанолом в соотношении 1:1. Были созданы правильные регулярные рельефные структуры, обладающие высокой ДЭ в первом порядке дифракции до 25 % и малой долей нерассеянного света – около 1.7 %. Высота поверхностного рельефа структур на проявленных подложках ПММА (рис. 1, кривая 2) в несколько раз превышает эту величину для непроявленных образцов (кривая 1), что доказывает эффективность применения проявителя, содержащего МИБК. Решетки на подложке из ПММА при освещении He-Ne лазером с длиной волны 0,63 мкм демонстрируют высокие значения ДЭ, приблизительно соответствующие их значениям, полученным по формуле теории тонких рельефно-фазовых голограмм [5].

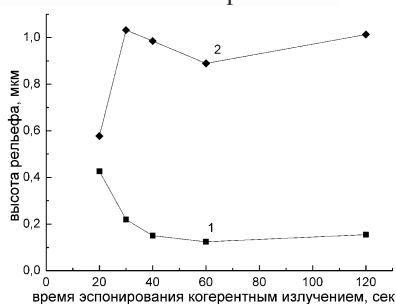


Рис. 1. График зависимости высоты рельефа структур от времени экспонирования

Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т.42. В.19. С.26-30.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Оптический журнал. 2017. Т.84. №9. С.1-5.
3. McCord M.A., Rooks M.J. // Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication. Washington: SPIE Optical Engineering Press. 1997. V.1. P.139-250.
4. Моро У. Микролитография. В 2-х частях. М.: Мир, 1990.
5. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т.70. №2. С.45-49.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ,
К.М. ЖУМАЛИЕВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,
Кыргызская Республика*

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ НА ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИЙ НОСИТЕЛЬ

Получены теоретические соотношения, позволяющие оценить влияние температуры записывающего слоя фототермопластического носителя на дифракционную эффективность сформированной на данном носителе фазовой голограммы.

N.K. DZHAMANKYZOV, Y.K. ISMANOV,
K.M. ZHUMALIEV, S.A. ALYMKULOV

*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of NAS KR,
Bishkek, Kyrgyz Republic*

THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DIFFRACTION EFFICIENCY OF HOLOGRAMS RECORDED ON A PHOTOTHERMOPLASTIC CARRIER

Theoretical relations are obtained that allow one to estimate the effect of the temperature of the recording layer of photothermoplastic carrier on the diffraction efficiency of the phase hologram formed on a given carrier.

Величина температуры T поверхности фототермопластического носителя прямо зависит от количества выделившейся тепловой энергии $Q = q_0 t$ внутри полупроводникового слоя за время воздействия лазерного излучения и позволяет проводить оценку температурных режимов записи информации.

Температурное изменение фазы тепловой волны $\Delta\Phi$ в поглощающем слое зависит от свойства вещества и определяется выражением

$$\Delta\Phi = kd \frac{dn}{dT} \frac{a}{\eta} q_0 t [1 + m \cos(ky)] \quad (1)$$

Здесь n -показатель преломления среды, $k = 2\pi / \Lambda$, η - коэффициент теплопроводности среды, m - глубина модуляции плотности световой

энергии в полупроводниковом слое, $q_0(z)$ – усредненная по объему мощность тепловыделения, $\Lambda = \lambda / (2 \cos \theta)$ – период пространственной тепловой решетки, λ – длина волны лазерного излучения, θ – угол падения на слой светового пучка, a – коэффициент температуропроводности материала. Дифрагирующие свойства светоиндуцированных решеток можно описать с помощью дифракционной эффективности. Комплексное пропускание тепловой решетки можно представить в следующем виде

$$t_r = e^{i\Lambda\Phi} = \exp\left(ikd \frac{dn}{dT} \frac{a}{\eta} q_0 t\right) \exp\left[imkd \frac{dn}{dT} \frac{a}{\eta} q_0 t \cos(ky)\right]. \quad (2)$$

Воспользовавшись соотношением $e^{iz \cos \varphi} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(z) e^{im\varphi}$ выражение для дифракционной эффективности тонкой фазовой голограммы можно

представить в виде $\eta_1(t) = SJ_1^2\left(kd \frac{dn}{dT} \frac{a}{\eta} mQ(t)\right)$. Здесь $J_1(z)$ функция

Бесселя первого рода 1-го порядка и описывает она амплитуду дифрагированных волн, S – пропускание слоя толщиной d на длине волны дифрагируемого излучения. Как видно из этого соотношения, яркость дифракционных максимумов зависит от количества тепла внутри полупроводникового материала, выделившегося к моменту времени t [1-5].

Список литературы

1. Джаманкызов Н.К. Оценка параметров фототермической записи в различных средах // Наука, новые технологии и инновации. 2009. №10. С.3-8.
2. Джаманкызов Н.К., Жумалиев К.М. О скоростной записи голограмм на фототермопластических носителях // IV Международной конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.204.
3. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. №3(39). С.56-60.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.101-103.
5. Исманов Ю.Х. Влияние длины волны на восстановленное изображение // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.104-106.

В.Д. ЧЕБУРКАНОВ, В.Е. ТАЛАЛАЕВ, И.К. ЦЫГАНОВ,
В.В. КОЛЮЧКИН, С.Б. ОДИНОКОВ, Н.В. ПИРЮТИН
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ЭКСПЕРТНО-КРИМИНАЛИСТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИАГНОСТИКЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ**

В статье представлен автоматизированный оптико-электронный программно-аппаратный комплекс для диагностики, идентификации и контроля подлинности дифракционных и голограммных оптических защитных элементов. Комплекс позволяет существенно упростить работу эксперта при проведении криминалистических исследований объектов маркированных защитными голограммами.

V.D. CHEBURKANOV, V.E. TALALAYEV, I.K. TSYGANOV,
V.V. KOLYUCHKIN, S.B. ODINOKOV, N.V. PIRYUTIN
Bauman Moscow State Technical University

**HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCH
AND COMPREHENSIVE EXAMINATION OF MACRO- AND
MICRO-OPTICAL ELEMENTS OF SECURITY HOLOGRAMS**

This paper is presenting the results of automated optical-electronic hardware and software complex for the diagnosis and identification of diffraction and holographic optical security elements development. Said complex allows to significantly simplify the work of an expert in criminalistics studies of the documents marked with protective holograms.

Защита от массовой подделки особо важных документов является серьезной проблемой мировой экономики. Одним из наиболее эффективных методов защиты от подделки документов является использование защитных голограмм. Качество поддельных голограмм достигло такого уровня, что неквалифицированный потребитель не может отличить оригинальную голограмму от поддельной. В этой связи появилась необходимость в приборах контроля подлинности голограмм.

Одним из уровней оценки подлинности голограмм является экспертный. Поэтому создание экспериментального образца автоматизированного комплекса для проведения экспертно-

криминалистических исследований защитных голограмм является актуальной задачей.

Разработанный комплекс позволил существенно упростить работу эксперта при проведении криминалистических исследований объектов, маркированных дифракционными защитными элементами (далее ДЗЭ) или голограммными защитными элементами (далее ГЗЭ).

Идентификационные исследования образцов ДЗЭ-ГЗЭ проводились на комплексе, при помощи Специализированного Программного Обеспечения (далее СПО) и заключались в выявлении в их составе различных элементов защиты и их параметров для установления соответствия исследуемого образца эталону. Данные об эталонном образце должны присутствовать заведомо в базе данных.

В состав комплекса (рис. 1 и 2) входят следующие технические средства:

1. Предметный стол с возможностью трехкоординатного линейного перемещения и вращения исследуемого образца.

2. Блок подвижного некогерентного осветителя с мощностью светодиода 20 Вт и диапазоном длин волн 350-750 нм (подсистема «Макро»);

3. Блок подвижного когерентного осветителя с мощностью лазерного излучения 5мВт и длиной волны лазерного излучения 650нм (подсистема «Макро»);

4. Блок регистрации, состоящий из фотоаппарата Canon EOS 80D с макрообъективом Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

5. Отдельно стоящий микроскоп Leica DM6

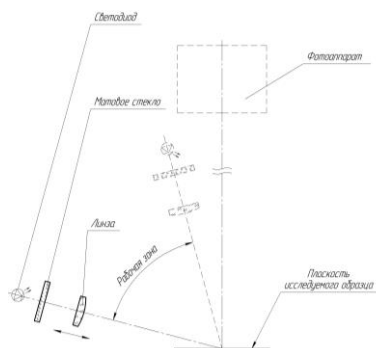


Рис. 1. Оптическая схема комплекса в режиме «Макро»

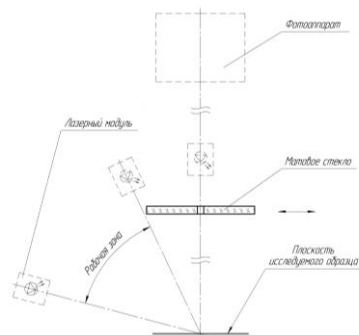


Рис. 2. Оптическая схема комплекса в режиме «Макро»

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**КОРРЕКЦИЯ НУЛЕВОГО ПОРЯДКА
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНО-
СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ,
ЗАПИСАННЫХ В СХЕМЕ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ПРОЕКЦИИ**

В работе представлены результаты численного моделирования проекционной некогерентной схемы записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье со сдвиговым мультиплексированием.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.V. KRASNOV, P.A. CHEREMHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**ZERO ORDER CORRECTION OF SHIFT-MULTIPLEXED
COMPUTER GENERATED FOURIER HOLOGRAMS
RECORDED IN INCOHERENT PROJECTION SCHEME**

The results of numeric modeling of computer generated Fourier holograms shift-multiplexed record in incoherent projection scheme are presented

Метод некогерентной проекционной записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье (КСГФ) позволяет легко и быстро получить качественные микро-голограммы двумерных цифровых объектов не требуя при этом сложных оптических установок [1].

На рис. 1 представлен эквивалент некогерентной проекционной схемы мультиплексной записи КСГФ. В качестве источника света в схеме используется полупроводниковый световой диод (СД). Коллимированный световой пучок равномерно освещает апертуру ПВМС, который отображает рассчитанное изображение функции прозрачности КСГФ. Следом используется система оптической проекции, строящая изображение экрана ПВМС в плоскости голографического носителя. Смещение голографического носителя в вертикальном и горизонтальном направлениях в плоскости изображения обеспечивает запись нескольких голограмм на его поверхности (мультиплексирование со сдвигом).

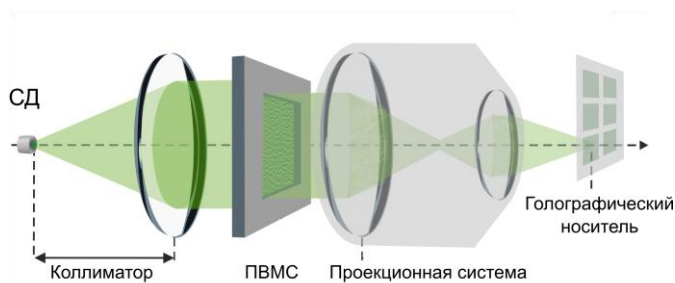


Рис. 1. Схема некогерентной проекционной записи КСГФ со сдвиговым мультиплексированием

Для численного моделирования процесса записи и восстановления КСГФ была использована модель голографической пластины, содержащей 3×3 мультиплексных структур КСГФ. В результате расчётов восстановленного поля было выяснено, что наличие зазора между записанными структурами приводит к существенным искажениям нулевого порядка (рис. 2а), однако добавление к голограммам рамки с Гауссовым градиентом позволило значительно сжать область нулевого порядка и добиться качественного восстановления светового поля (рис. 2б).

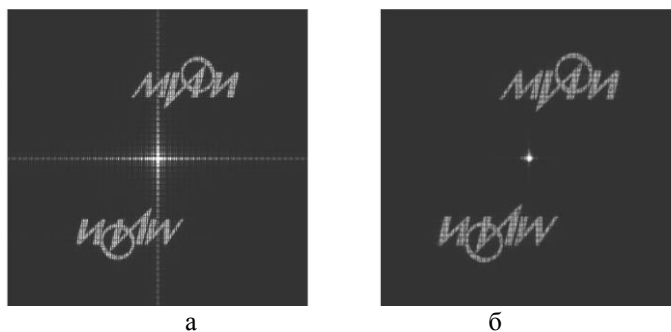


Рис. 2. Вид восстановленного светового поля: с голограммы без градиентной маски (а); с голограммы с градиентной рамкой (б)

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №17-07-00254.

Список литературы

1. Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Odnokov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms // Applied Optics. 2013. V.52. No.33. P.8142–8145,

П.А. ХАНЕВИЧ, С.Б. ОДИНОКОВ, С.С. ДОНЧЕНКО,
С.А. СЕМИШКО

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ
НА МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫЕ ОДНОМЕРНЫЕ
МИКРОГОЛОГРАММЫ ФУРЬЕ
ДЛЯ ОПТИКО-ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
АРХИВНОЙ ПАМЯТИ**

Проанализированы критерии состояния наведения оптической системы считывания на мультиплексированные одномерные микроголограммы Фурье. Сформулированы требования к разрабатываемому алгоритму наведения. Приведены результаты экспериментальных исследований алгоритма наведения для серии тестовых изображений.

P.A. KHANEVICH, S.B. ODINOKOV, S.S. DONCHENKO,
S.A. SEMISHKO

Bauman Moscow State Technical University

**DEVELOPMENT OF THE ANGLE GUIDANCE ALGORITHM
FOR OPTICAL READING SYSTEM TO MULTIPLEXED
1D-FOURIER MICROHOLOGRAMS FOR HOLOGRAPHIC
ARHIVE MEMORY SYSTEM**

The criteria of reading optical system's state on aiming the 1D-Fourier microholograms were analysed. The requirements for being developed aiming algorithm were specified. The results of experimental research of the developed aiming algorithm with the use of test images were presented.

В прошлых работах [1-4] был предложен и рассмотрен метод проекционной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье. При проекционной записи используются одномерные КС МГФ (компьютерно-синтезированные микроголограммы Фурье).

Увеличение плотности хранения достигается мультиплексной записью одномерных КС МГФ, путем поворота среды вокруг плоскости записи. Мультиплексная голограмма представляет собой результат наложения на один и тот же участок голографического носителя нескольких голограмм

(далее субголограмм). Для отдельного считывания мультиплексированных одномерных МГФ была разработана специальная ОСС (оптическая система считывания), состоящая из излучателя, линзового блока, светоделительного кубика, пространственного фильтра, голографического носителя и КМОП-камеры.

Экспериментальные испытания показали, что максимальная точность и скорость дают анализ контраста кадра.

$$K = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (B_{ij} - \bar{B})^2}, \quad (1)$$

где K – контраст, B_1 и B_2 – интенсивность областей изображения, B_{\max} – максимальная интенсивность изображения, M и N – размеры изображения, B_{ij} – координаты текущего пикселя, \bar{B} – средняя скорость изображения.

На рис. 1 представлены графики зависимости контраста столбцов изображения полученного от номера кадра для серии при скорости вращения шагового двигателя 100 шагов в секунду с нулевым порядком и без него, рассчитанные по формуле (1).

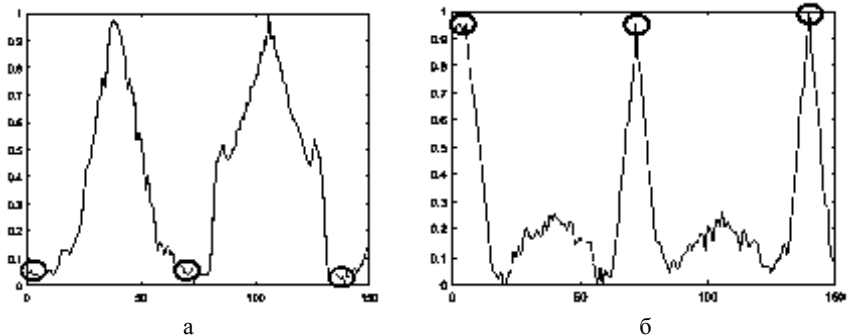


Рис. 1. Графики зависимости контраста линий и столбцов изображения от номера кадра для серии при скорости вращения шагового двигателя 100 шагов в секунду контраст линий (а), контраст столбцов (б)

Список литературы

1. Odinov S.B., Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Evtikhiev N.N., Zherdev A.Yu., Zlokazov E.Yu., Lushnikov D.S., Markin V.V., Starikov R.S., Starikov S.N. // *Quan. Electr.* 2013..V.43. №1. P.87-89.
2. Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Odinov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. // *Applied Optics.* 2013. V.52. №33. P.8142-8145.
3. Donchenko S.S., Odinov S.B., Bobrinev V.I., Betin A.Yu., Zlokazov E.Yu. // *Proc.SPIE.* 2015. V.9508. P.9508A.
4. Campbell F.W., Robson J.G. // *Journal of Physiology.* 1968. V.197. №3. P.551–566.

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ
COMPRESSIVE SENSING ИЗ ОДНОПИКСЕЛЬНЫХ
РЕГИСТРАЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
DMD-МОДУЛЯТОРА**

Проведено моделирование регистрации излучения от объектов однопиксельным детектором при использовании микрозеркального (DMD) модулятора света. Используя методы компрессионного считывания, проведены эксперименты по восстановлению изображений цветных, полутоновых и бинарных объектов, полученных при различных условиях регистрации.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**OBJECTS RECONSTRUCTION BY COMPRESSIVE SENSING
FROM SINGLE-PIXEL REGISTRATIONS USING DMD**

Detection of illumination from the objects by a single-pixel detector using a DMD was modeled. By compressive sensing theory color, grayscale and binary object images obtained under various recording conditions were reconstructed.

При регистрации изображений обычно используются камеры с числом пикселей в десятки миллионов. Однако значительная часть информации избыточна в полученных снимках. Развитие вычислительной фотографии, в том числе compressive sensing (CS [1, 2]) позволило получать изображения всего объекта с приемлемым качеством, регистрируя лишь некоторые проекции объекта. Практическим примером CS является регистрация однопиксельной камерой излучения, идущего от объекта и прорезанного, например, микрозеркальным модулятором (DMD, Digital Micromirror Device) [3-5]. На DMD выводятся случайные массивы значений. Схема рассматриваемой установки представлена на рис. 1.

Проведены численные эксперименты по моделированию однопиксельных регистраций излучения и восстановлению объектов различными методами CS. Получены оценки качества восстановления, времени расчета, в том числе в сравнении с методом минимизации нормы l_2 . Примеры объектов и результатов восстановления показаны на рис. 2.

Среднее число регистраций для каждого объекта равнялось 400, что в 20 раз меньше числа пикселей в исходных объектах (по 8000 пикселей).

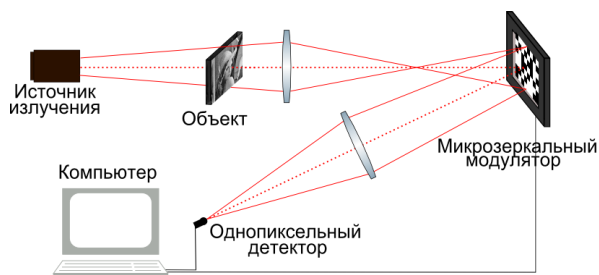


Рис. 1. Схема регистраций сигнала однопиксельным детектором

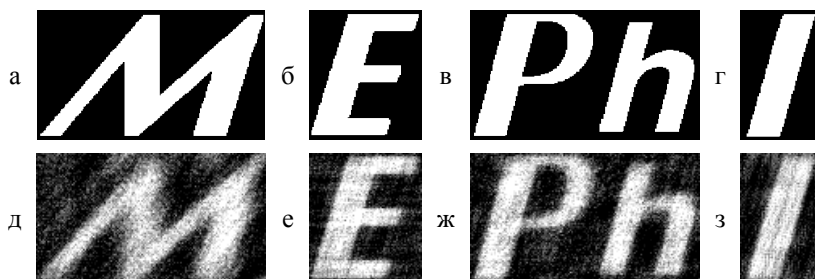


Рис. 2. Исходные (а-г) и восстановленные (д-з) изображения объектов

Таким образом, проведены эксперименты по однопиксельной регистрации и восстановлению изображений объектов. Подобные системы используются и могут быть использованы для быстрого получения изображений как в видимом, так и в инфракрасном излучении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-07-00829.

Список литературы

1. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. V.52. P.1289-1306.
2. Candès E.J. Compressive sampling // ICM 2006. 2006. V.3. P.1433-1452.
3. Takhar D., Laska J.N., Wakin M.B., et al. A New Compressive Imaging Camera Architecture using Optical-Domain Compression // Proc. SPIE. 2006. V.6065. P.606509.
4. Yu W.-K., Yao X.-R., Liu X.-F., et al. Three-dimensional single-pixel compressive reflectivity imaging based on complementary modulation // Appl. Opt. 2015. V.54. P.363-367.
5. Dai H.-D., Gu G.-H., He W.-J., Chen Q., Mao T.-Y. Adaptive video compressed sampling in the wavelet domain // Opt. Laser Technol. 2016. V.81. P.90-99.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ,
Т.Д. ТЫНЫШОВА, С.А. АЛЫМКУЛОВ

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,
Кыргызская Республика*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ БЕСЩЕЛЕВОЙ РАДУЖНОЙ ГОЛОГРАММЫ КОГЕРЕНТНОЙ ВОЛНОЙ

В докладе рассматриваются результаты компьютерного моделирования процесса восстановления бесщелевых радужных голограмм когерентной волной.

Y.K. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV,
T.D. TYNYSHOVA, S.A. ALYMKULOV

*Institute of Physical and Technical Problems and Materials Science of NAS KR,
Bishkek, Kyrgyz Republic*

RECONSTRUCTION OF A SLITLESS RAINBOW HOLOGRAM BY A COHERENT WAVE

The report discusses the results of a computer simulation of the recovery process for slitless rainbow holograms by using a coherent wave.

Компьютерное моделирование процессов записи и восстановления голограмм, записанных с использованием второго опорного пучка соосного объектной волне, проводилось на основе математической модели процесса записи бесщелевых радужных голограмм [1-3]. В предложенной модели голограмма восстанавливалась когерентным светом. Запись и восстановление голограммы проводились в зоне Френеля, т.е. для формирования математической голограммы использовалось преобразование Френеля [4-5]. Для формирования опорного пучка, соосного объектной волне, бралось направление зеркальной составляющей отраженной от объекта волны. Для усиления второй опорной волны в предложенной модели, в плоскости, на которую проектируется объемный объект, размещается зеркало. Такая схема записи позволяет получить высокоинтенсивный пучок света, совпадающий по направлению с объектной волной. На рис. 1а показано исходное изображение сферы, на рис. 1б представлено изображение сферы, восстановленное с голограммы, записанной с использованием второго опорного пучка. Восстановление осуществлялось сферической опорной

волной, сформированной как результат преобразования Френеля для точечного опорного источника, расположенного в плоскости проекции объемного объекта. Т. е. результат аналогичен тому, что получается для квази-голограммы Фурье, с учетом фактора воздействия второй опорной волны.

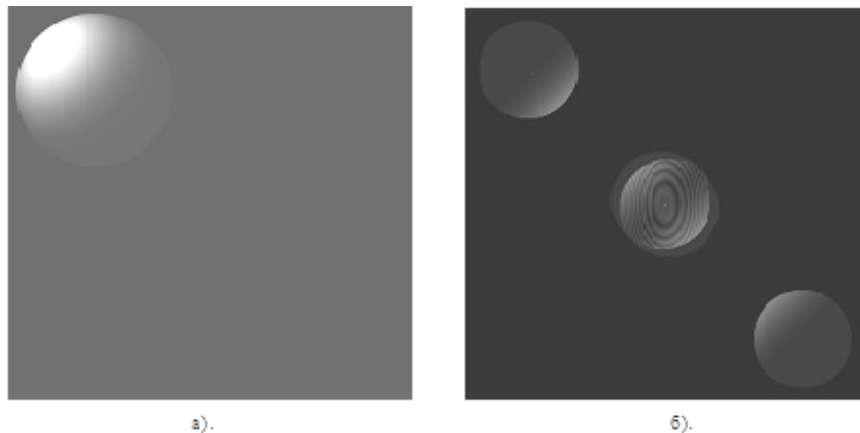


Рис. 1. Исходное изображение сферы (а), восстановленное изображение сферы (б), голограмма записана с использованием второго опорного пучка, соосного объектной волне, восстановление сферической опорной волной, точечный опорный источник расположен в плоскости объекта

Как видно из рис. 16, наличие второй опорной волны приводит к восстановлению не только действительного и мнимого изображений (± 1 порядки), что естественно при наличии одной опорной волны, но и к восстановлению изображений в нулевом порядке, которые при наложении двух изображений формируют интерференционную картину.

Список литературы

1. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot Interferometer // Proceedings of SPIE. 2000. V.4149. P.213-220.
2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four -channel wide-range holographic interferometer // Proceedings of SPIE. 2003. V.5144. P.606-612.
3. Жумалиев К.М., Алымкулов С.А., Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А. Анализ голографических интерферограмм // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2016. №3(39). С.56-60.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.101-103.
5. Исманов Ю.Х. Влияние длины волны на восстановленное изображение // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С.104-106.

В.В. КРАСНОВ, Е.Д. МИНАЕВА, В.Г. РОДИН,
П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. ШИФРИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КИНОФОРМОВ

Для повышения качества оптического восстановления изображений была осуществлена синхронизация пространственно-временного модулятора света ПВМС и регистрирующей камеры, исключено влияние паразитного нулевого дифракционного порядка, проведена sinc-коррекция в поле восстановленного изображения, понижено влияние спекл-шума за счет мультиплицирования киноформов.

V.V. KRASNOV, E.D. MINAEVA, V.G. RODIN,
P.A. CHEREMKHIN, A.V. SHIFRINA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

METHODS OF INCREASING OF KINOFORMS OPTICAL IMAGE RECONSTRUCTION QUALITY

The synchronization of the spatial light modulator (SLM) and the registering camera was implemented. Negative impact of parasitic zero diffraction order was suppressed. Sinc-correction was implemented. Effect of speckle noise was reduced by multiplication of kinoforms.

Качество оптического восстановления изображений с киноформов [1-3] страдает из-за многих факторов, что приводит к потере информативности. Основными факторами являются: фазовые флуктуации в пространственно-временном модуляторе света (ПВМС), на котором отображается киноформ, приводящие к появлению нулевого порядка дифракции в центре поля восстановления [4-6]; затухание яркости от центра к краям, а также спекл-шум [7].

Для борьбы с паразитным нулевым порядком было использовано пространственное разделение паразитного нулевого и полезного первого порядков дифракции.

Наряду с пространственным разделением порядков дифракции была осуществлена синхронизация ПВМС и камеры. Это, наряду с повышением качества оптического восстановления, приводит также к повышению дифракционной эффективности. Синхронизация необходима

для того, чтобы камера, регистрирующая поле восстановленного изображения, снимала кадр в определенный момент времени относительно начала показа кадра на ПВМС. В качестве метода борьбы со спекл-шумом к киноформам было применено мультиплицирование [8]. При мультиплицировании повышается пространственная частота киноформ, что приводит к уменьшению размера отсчета на поле восстановления.

Из-за конечного размера пикселей яркость восстановленного изображения спадает от центра к краям. Для устранения данного эффекта на этапе синтеза киноформа использовалось поле коррекции, которое позволяет сохранять яркость изображения постоянной по всему полю при регистрации восстановленного изображения фотосенсором камеры.

Были проведены две серии экспериментов по восстановлению изображений с киноформ: в первой использовалось пространственное разделение паразитного нулевого и информативного первого порядков дифракции, а во второй – синхронизация ПВМС и регистрирующей камеры. Коррекция яркости и устранение спекл-шума применялись в обеих сериях экспериментов. Использование синхронизации ПВМС и регистрирующей камеры позволило повысить дифракционную эффективность, тем самым уменьшив интенсивность нулевого порядка дифракции. В первой серии экспериментов размер восстановленного изображения составлял 80 x 80 пикселей, а во второй серии размер восстановленного изображения был увеличен до 128 x 128 пикселей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-37-00343.

Список литературы

1. Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A. The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device // IBM J. Res. Dev. 1969. V.13 (2). P. 150-155.
2. Соيفер В.А. Дифракционная компьютерная оптика. Физматлит, 2007.
3. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a personal tour // Appl. Opt. 2013. V.52. P.45-56.
4. Lizana A., et al. Time fluctuations of the phase modulation in a liquid crystal on silicon display: characterization and effects in diffractive optics // Opt. Expr. 2008. V.16. P.16711-16722.
5. Chermkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Increasing reconstruction quality of diffractive optical elements displayed with LC SLM // Proceedings of SPIE. 2015. V.9386. P.93860R.
6. Chermkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Modeling of effect of LC SLM phase fluctuations on kinoforms optical reconstruction quality // Proceedings of SPIE. 2015. V.9508. P.95080U.
7. Amako J., Miura H., Sonehara T. Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator // Appl. Opt. 1995. V.34. P.3165-3171.
8. Wyrowski F., Hauck R., Bryngdahl O. Computer-generated holography: hologram repetition and phase manipulations // J. Opt. Soc. Am. A. 1987. V.4 (4). P.694-698.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Абдирали Е.Е. 312
Абдрахманов В.Л. 542
Абдуллаев С.Д. 118
Абрамова А.А. 550
Авдеева А.Ю. 370
Авдижиян А.Ю. 74
Авербух Б.Б. 434, 444
Авербух И.Б. 434, 444
Аверин С.В. 89, 396
Авершин А.А. 208
Авласевич Н.Т. 578, 582
Агеев А.Е. 336
Агеев Э.И. 414
Адамов А.А. 542
Акимова Я.Е. 334
Акмалов А.Э. 210
Аксенов А.С. 118
Аксёнов Е.Т. 222, 522
Алагашев Г.К. 494
Александров С.Е. 132
Алексеев А.С. 144
Алексеев К.Н. 520
Алиев С.А. 112
Алоян Г.А. 44, 134
Алыкова О.М. 412
Алымкулов С.А. 282, 586, 596
Альтшулер Г.Б. 502, 512
Ананьев В.А. 462, 464
Андреев А.Л. 32
Андреев А.С. 352
Андреева Т.Б. 32
Андреева Я.М. 414
Антонов Е.А. 362, 368
Антропова Т.В. 358, 458, 460
Анфимова И.Н. 458
Аракелян С.М. 58
Арсеньян Т.И. 254
Артюков И.А. 234
Архипкин В.Г. 176
Архипов Д.Н. 446
Астапович М.С. 188, 494
Асташкевич С.А. 442, 446

Ахматханов А.Р. 36
Ахмедшина Е.Н. 570

-Б-

Бабкин О.Э. 404
Бабкина Л.А. 404
Баграташвили В.Н. 146
Бадиков В.В. 314
Бадиков Д.В. 314
Баззал Х. 482
Байкова Т.В. 214
Бакунов М.И. 124, 182
Баранов А.В. 62, 108
Баранов М.А. 62
Баранов М.С. 542
Бардакова К.Н. 504
Баршак Е.В. 342
Барышев С.А. 154
Бахмутов Д.Н. 214
Безниско Е.И. 412
Бендеров О.В. 142
Беринцев А.В. 144
Беспалов А.В. 114, 122
Беспалов В.Г. 52, 186
Бикбаев Р.Г. 176
Бланк А.В. 254
Бобрева Л.А. 294
Богачков И.В. 102, 340, 344, 352
Бодров С.Б. 124
Бойченко А.П. 538
Болдырев К.Н. 54, 72
Боритко С.В. 87
Бородако К.А. 532
Бочаров А.А. 76
Брецько М.В. 292
Булычев Р.П. 560
Бурдукова О.А. 190
Буримов Н.И. 48
Бусаров А.С. 234
Бусурин В.И. 224, 560, 564
Буть А.И. 582
Буфетов И.А. 188, 494
Бухарин М.А. 38

Быковский А.Ю. 236
Былина М.С. 180, 554
Бычков С.Б. 97
Бышевский-Конопко О.А. 330

-В-

Вайчас А.А. 500
Вартапетов С.К. 466
Василенко А.Н. 220
Васильев Н.Д. 150
Васильцов В.В. 492
Вахтомин Ю.Б. 60, 400
Вейко В.П. 414, 458, 460, 468
Векшин М.М. 316, 322
Великасов С.С. 158
Великовский Д.Ю. 330
Величко Е.Н. 222
Вергелес С.С. 184
Ветров С.Я. 176, 370, 374
Викулин Д.В. 342
Вилейшикова Е.В. 376
Вин Й.Н. 224
Винаров А.З. 212
Винниченко В.А. 502, 512
Виноградов А.В. 234
Виноградова П.В. 284
Витухновский А.Г. 148
Владимиров А.П. 260
Власов М.Ю. 514
Войцеховский А.В. 394
Волгина Д.А. 62
Волков В.Г. 548, 552
Волков И.В. 97, 354
Волкова Н.А. 422
Волова Л.Т. 508, 514
Волостников В.Г. 248
Вольхин Ю.Н. 352
Воронцов Е.Н. 248
Воронцов М.С. 302
Воронцова Е.Ю. 42
Воропай Е.С. 482
Вохминцев К.В. 108
Вохник О.М. 254
Вьюнышев А.М. 176, 374

-Г-

Гаврилов Г.А. 132
Гаверушко В.В. 550
Гайтко О.М. 424

Галуцкий В.В. 310
Галушкин М.Г. 470, 474, 492
Гамиловская А.В. 352
Ганин Д.В. 466
Ганжерли Н.М. 584
Гарнаева Г.И. 570
Гартман А.Д. 120
Герасимов В.С. 384
Гераськин А.А. 114
Гиндин П.Д. 548, 552
Гирсова М.А. 460
Глазголев С.Ф. 180, 554
Гладуш М.Г. 366, 516
Гладышев А.В. 188, 494
Глинский И.А. 126
Голикова О.Л. 122
Головань Л.А. 360
Голубев А.В. 542
Гольцман Г.Н. 408
Гончаров Д.С. 572, 578
Гончаров С.А. 356
Гончуков С.А. 214
Горбач Д.В. 156
Горбач В.В. 418
Горелик В.С. 286
Горяев М.А. 420
Горячев Л.В. 524, 526
Грачев Я.В. 52
Гребенников Е.П. 64
Гречишкин Р.М. 42, 302
Губин М.Ю. 172, 516
Гуляев С.Н. 584
Гурская Е.М. 310

-Д-

Давыдов В.Н. 380, 398, 402
Данилов В.А. 328
Данилов П.А. 416
Данг В.Х. 564
Дворецкий Д.А. 194
Демидов В.В. 462, 464
Денисов Л.К. 194
Денисюк И.Ю. 46
Джаманкызов Н.К. 282, 586, 596
Джиоев С.Э. 336
Дзедолик И.В. 174
Дзядух С.М. 394
Дивочий А.В. 60, 400
Дмитриев А.Л. 204

Дмитриева К.А. 532

Довгий А.А. 168

Довженко Д.С. 372

Долгирев В.О. 518

Долгих И.А. 390

Донченко С.С. 592

Дорожкин А.Н. 100

Дорофеев В.В. 454

Дружин В.В. 162

Друкаренко Н.А. 260

Дубовик А. 62

Дубровин В.Д. 78, 364

Дубровин Р.М. 54

Дуденкова В.В. 274

Дудкина Т.Д. 424

Дудова Д.С. 504

Дымов А.М. 212

Дю В.Г. 298

-Е-

Евлашин С.А. 176

Евстропьев С.К. 422

Евтихийев Н.Н. 242, 244, 502, 512

Евтихьева О.А. 558, 562, 576

Егоров А.Н. 536

Егоров Ф.А. 202

Егоров Ю.А. 334

Егорова О.Н. 80

Егорышева А.В. 424

Екимов Е.А. 366

Елистратова Е.А. 464

Еремчев И.Ю. 366

Ерин Д.Ю. 80

Ермаков А.Д. 76

Ершов А.Е. 384

Ефимов Т.А. 216

-Ж-

Жданова К.Д. 386

Жевайкин К.Е. 46

Жеглов М.А. 560

Жигарьков В.С. 146

Жирков А.О. 162

Жителев А.Е. 104

Житов В.А. 396

Жукова М.О. 52

Жумалиев К.М. 282, 586

Журин Т.А. 304

-З-

Забалуева З.А. 222

Заботнов С.В. 360

Задорожный С.П. 208

Забогин А.П. 482

Заичко К.В. 346

Зайцев В.В. 218

Заколдаев Р.А. 448, 458, 460, 478, 488

Закомирный В.И. 384

Заляпин Н.В. 32

Захаревич Г.Б. 376

Захаренко А.М. 216

Захаров Л.Ю. 396

Захаров Ю.Н. 274

Звагельский Р.Д. 148

Зверев П.Г. 198, 490

Звиненко К.К. 448

Земцов Д.С. 106

Зиновьев Е.В. 64

Злобин А.О. 48

Злоказов Е.Ю. 106, 590

Золотов Ф.И. 60, 400

Зулина Н.А. 70

-И-

Ибрагимов А.Э. 520

Иванов А.А. 532

Иванов А.В. 118

Иванов А.С. 206

Иванов Д.А. 336

Иванов П.А. 246

Иванов С.А. 428

Иванова А.И. 50

Иванова А.К. 116

Иванова П.В. 42

Иванова Ю.В. 566

Игнатов А.И. 142

Игнатьев А.И. 426, 428, 430

Ильина В.В. 404

Ионин А.А. 116, 314, 416

Исмаилов Д.А. 264

Исмаилов Ш.М. 540

Исманов Ю.Х. 264, 282, 586, 596

Истомина О.В. 422

Истратов А.В. 58

Исхакова Л.Д. 80

-К-

- Казанцева Е.В. 178
Каине С.М. 562
Калашников Е.В. 556
Каленков Г.С. 160
Каленков С.Г. 160
Калугин А.И. 362, 368
Каменев В.Г. 540
Каменев О.Т. 546
Каминская Т.П. 360
Камшилин А.А. 218
Каплунов И.А. 42, 50, 302
Капралов А.А. 132
Карандин А.В. 87, 330
Каранкевич О.А. 380, 398, 402
Каранский В.В. 320
Карасик В.Е. 194
Карев П.В. 152, 528
Карпов С.Н. 172
Карцев П.Ф. 432
Катковник В.Я. 568
Кашаев Ф.В. 360
Кашкаров П.К. 360
Кийко Н.К. 508
Киле Е.О. 34
Киняевский И.О. 314
Киреев А.Н.М. 284
Кислов Д.А. 68, 382
Кистенева М.Г. 304
Кичанов С.Е. 376
Климачев Ю.М. 314
Клычкова Д.М. 272
Князев К.И. 70
Князьков А.В. 318
Кобранова А.А. 368
Коваленко А.А. 502, 512
Коваленко Н.В. 44, 134
Ковалев М.С. 252, 278, 280
Коваль В.В. 478, 488
Кованис В. 28
Козлов А.А. 118
Козлова Д.А. 428, 430
Козловский К.И. 484, 486
Кокорина Л.А. 510
Колегов А.А. 312
Колесников А.И. 42, 302
Колмычек И.А. 110, 390
Колобова Е.В. 422
Колоколов И.В. 184
Колчин А.В. 360
Колымагин Д.А. 148
Колючкин В.В. 588
Колядин А.Н. 188, 494
Компанец И.Н. 32
Кондрашов И.И. 76
Конеев Р.В. 438
Кононенко В.С. 254
Коньшеев В.А. 100, 104
Коняшкин А.В. 134, 530
Копытов Е.Ю. 340
Копьев П.С. 480
Копьева М.А. 112
Коркишко Ю.Н. 38
Кормилина Т.К. 62
Корнеев А.А. 408
Корнеева Ю.П. 408
Коробков В.В. 224, 564
Коробков К.А. 560
Короленко П.В. 256
Косолапов А.Ф. 188, 494
Кострицкий С.М. 38
Костина Г.В. 284
Костюк Г.К. 458
Котковский Г.Е. 210
Котов В.М. 89, 396
Котова С.П. 248
Крайский А.В. 270
Красин Г.К. 252
Красников И.В. 164
Краснов В.В. 244, 590, 598
Кривенков В.А. 356
Кривобок В.С. 56
Криштоп В.В. 284
Кружалов С.В. 150
Крымский М.И. 496
Крюкова И.С. 372
Кубанов Р.Т. 256
Куделин И.С. 194
Кудринский А.А. 120
Кудряцев П.С. 230
Кудряшов С.И. 116, 416
Кузиванов М.О. 478
Кузнецов А.Н. 258
Кузнецов А.С. 154
Кузнецов И.О. 432
Кузнецов П.А. 258
Кузнецов П.И. 396
Кузьмин М.С. 574

Кузяков Б.А. 336, 350
Кулабухова А.Ю. 508
Кулаков М.Н. 594
Кулмурзаев Н.М. 264
Кульчин Ю.Н. 216
Куля М.С. 186
Кундикова Н.Д. 30
Куплевич М.А. 316
Купцов В.Д. 522
Курбатова Е.А. 242
Курилкина С.Н. 156
Кутанов А.А. 158
Кутровская С.В. 58
Кучеренко М.Г. 382, 388, 392
Кучерик А.О. 58

-Л-

Лавров А.П. 150
Лавров Е.А. 91
Лавров С.Д. 74
Лаврова Е.Ю. 50
Лапаева С.Н. 292
Лапицкий К.М. 566
Лапшин К.Э. 466
Лебедев В.В. 184
Лебедев В.С. 56
Лебедев В.Ф. 358
Левченко К.С. 64
Лекарев В.Ю. 212
Лентовский В.В. 480
Леонов А.В. 104
Леонов М.Б. 150
Леонов С.О. 464
Ливашвили А.И. 284
Линьков П.А. 108
Лисовский М.И. 484
Литвинова М.Н. 290
Лихачев М.Е. 188, 494
Лозинг Н.А. 366
Посевский Н.Н. 248
Лукашова Т.О. 136
Лукиных С.Н. 100, 104
Лутченко С.С. 340
Льюнг В.К. 468
Лычковский В.В. 482
Львов К.В. 166
Лю Ч. 230
Ляпиков А.М. 578, 582
Ляхова М.Б. 302

-М-

Маврицкий О.Б. 536
Мазин М.А. 95
Мазур М.М. 91
Майдыковский А.И. 120
Маймистов А.И. 168
Макаева Р.Х. 226
Макаревич А.В. 48
Макин В.С. 40, 450, 456
Макин Р.С. 40, 450, 456
Максименко В.А. 300
Максимов Л.В. 130
Максимова С.В. 478
Малов А.Н. 262, 500, 506, 510
Мамонов Е.А. 386
Мамонтов О.В. 218
Мамрашев А.А. 130
Мандель А.Е. 36
Мануковская Д.В. 34
Манухов В.В. 206
Марцева А.В. 312
Масальский Н.В. 140
Матвеев Б.А. 132
Матюшин И.В. 150
Маурер И.А. 584
Машкович Е.А. 124
Мейнхардт-Волвебер М. 164
Мелехов А.П. 484, 486
Мелидина А.А. 404
Мельникова Е.А. 156
Миловидов В.С. 556
Милович Ф.О. 80
Минаев В.П. 26, 212
Минаев Н.В. 146, 504
Минаева Е.Д. 598
Минина О.В. 452
Миньков К.Н. 288
Миронова Т.В. 270
Миськевич А.И. 66
Митетело Н.В. 120, 386
Митюрева А.А. 436, 446
Михайлова Ю.А. 260
Могильный В.В. 406
Можаев Р.К. 348, 498
Можаева В.А. 314
Молодцов Д.Ю. 578
Молчанов В.Я. 83
Молчанова А.Д. 54, 72
Морозов А.В. 162

Морозов П.В. 60, 400
Морозов Ю.С. 478, 488
Мошкова М.А. 400
Мошцев И.С. 258
Мулин П.В. 224, 560, 564
Муратиков К.Л. 132
Мурзина Т.В. 110, 120, 170, 386
Мысливец С.А. 176

-Н-

Набиев И.Р. 62, 108, 356, 372
Надолинский А.М. 438
Назаров С.А. 156
Найденов П.Н. 114, 122
Наний О.Е. 100, 104
Насонов А.А. 170
Науменко Н.Ф. 83
Небаевский В.А. 106
Небогин С.А. 500, 506
Некрасов А.Д. 56
Немец В.М. 534
Непомнящая Э.К. 222
Несмелов С.Н. 394
Неупокоева А.В. 262, 506, 510
Нефедьев Л.А. 570
Никитин В.А. 316, 322
Никитин П.А. 324
Николаев Н.А. 130, 138
Николаев Н.Э. 112
Никоноров Н.В. 422
Новиков В.Б. 170
Новиков С.Г. 144

-О-

Образцова Е.Д. 76
Огородников Л.Л. 184
Огородников Ю.Ю. 238
Одинокоев С.Б. 154, 252, 278, 280, 588, 592
Одинцова Г.В. 468
Окунев Д.В. 308
Орехов И.О. 194
Орешкина К.В. 78, 364, 430
Орлов А.В. 214
Осинцев А.В. 266
Осипов А.В. 58
Осипов В.Г. 106
Охримчук А.Г. 454

-П-

Павлов А.В. 240
Павлов И.Н. 232
Павлов П.В. 262
Павлов С.В. 138
Палатников М.Н. 34, 290, 294
Панкин П.С. 176, 374
Паранин В.Д. 95
Парпин М.А. 150
Пеганов С.А. 534
Пентин И.В. 60
Перескоков В.С. 174
Петров Н.В. 186, 276, 568
Петров Н.И. 93, 328
Петров Ю.С. 546
Петухов В.А. 190
Печенкин А.А. 536
Пикуль О.Ю. 296
Пирютин Н.В. 588
Писарев Р.В. 54, 72
Писарева Е.В. 514
Пичугин И.С. 364, 426, 428, 430
Плеханов А.А. 484
Плёткин А.П. 238
Пнев А.Б. 194
Погодина В.А. 290
Подкопаев А.В. 66
Подлесных А.А. 546
Подсвилов О.А. 418
Пожар В.Э. 87
Полетаев Д.А. 250
Помозов А.Р. 110
Пономарев Д.С. 126
Пономарев Н.М. 572, 578
Попов В.В. 328
Попов Н.Л. 234
Попов М.Е. 386
Попова М.Н. 54
Порошин Н.О. 64
Потапов В.Т. 202
Потемкин Ф.В. 166
Потлов А.Ю. 544
Преснов Д.Е. 360
Примак И.У. 220
Присяжнюк А.В. 250
Проклов В.В. 326, 330
Проколова Д.В. 248
Проскурин С.Г. 544
Просников М.А. 54

Прохоров А.В. 172, 516
Прудников И.Р. 306
Прямыков А.Д. 188, 494
Пустозеров А.В. 308
Путилин А.Н. 162
Пьянков С.С. 578
Пятнов М.В. 370

-Р-

Ракович Ю.П. 356
Расковская И.Л. 232
Рачковская Г.Е. 376
Резвов Ю.Г. 326
Ринкевичюс Б.С. 232, 562
Розалин В.Е. 496
Рогов С.А. 574
Рогожин М.В. 496
Родин В.Г. 578, 598
Родионов В.А. 144
Романов В.В. 468
Ромашко Р.В. 216
Рот Б. 164
Ружицкая Д.Д. 288
Русинов А.П. 382
Ручка П.А. 278
Рыбась А.Ф. 520
Рыбин М.Г. 76
Рыбина С.С. 302
Рымкевич В.С. 488
Рыжикова Ю.В. 256
Рябушкин О.А. 44, 134, 530

-С-

Сабайдаш С.Ю. 538
Савин С.С. 114, 122
Савченко Е.А. 522
Савченков Д.В. 536
Савченков Е.Н. 36
Сазонкин С.Г. 194
Салихов Р. 472, 476
Самагин С.А. 248
Самойленко А.А. 288
Самохвалов П.С. 62, 108, 356
Сапожников А.А. 550
Сараева И.Н. 116, 416
Сафина Д.М. 226
Светухин В.В. 144
Свистунова Т.С. 214
Свяховский С.Е. 120, 176, 374

Слезнев В.А. 60
Семенов М.А. 190
Семенова В.А. 186
Семенова Л.Е. 440
Семёнов С.Л. 80
Семешко С.А. 592
Сергеев М.М. 414, 448, 458, 460, 488
Серебренников Л.Я. 312
Серегин Д.А. 150
Сетейкин А.Ю. 164
Сёмкин А.О. 518
Сиверс А.Н. 458
Сидоров А.И. 358, 378, 418
Сидоров Н.В. 32, 286, 290, 294
Сим Е.С. 304, 312
Симонов Н.О. 408
Сироткин А.А. 198, 490
Скобёлкина А.В. 360
Скорнякова Н.М. 558, 576
Скрябин Н.Н. 38
Смаев М.П. 454
Смирнов В.В. 446
Смирнов В.В. 412
Смирнов Д.В. 436
Смирнов К.В. 60, 400
Смирнов С.В. 304, 312, 320
Смуrows С.А. 318
Снопатин Г.Е. 91
Соколенко Б.В. 250, 520
Соколов Д.В. 298
Солдаткин В.С. 398
Соломашенко А.Б. 252
Сон Д.И. 518
Сорокин Н.И. 212
Сотникова Г.Ю. 132
Станкевич А.И. 406
Стариков Р.С. 106, 572, 578, 594
Старых Д.Д. 100
Степаниденко Е.А. 62
Степанов Б.С. 142
Столярчук М.В. 378
Стремоухов С.Ю. 166
Суетин Н.В. 228
Сухарева Н.А. 254
Щепуро Н.Г. 280
Сыдык уулу Н 158
Сычугин С.А. 182
Сюй А.В. 34, 290

-Т-

Такай К. 62, 108
Талалаев В.Е. 588
Таштимирова Д.У. 522
Тебенева Т.С. 142
Теплякова Н.А. 34
Теренина Л.В. 388
Тер-Нерсесянц Е.В. 462
Тигаев В.О. 464
Тимашев П.С. 504
Тимофеев А.А. 532
Тимофеев И.В. 176, 374
Тимченко Е.В. 508, 514
Тимченко П.Е. 508, 514
Токмашев Т.Д. 298
Толстик А.Л. 156
Третьяков С.А. 42, 50, 302
Третьякова М.Н. 510
Трещиков В.Н. 100, 104, 136
Трофимов Н.С. 112
Тугаенко В.Ю. 254
Туев В.И. 380
Тынышова Т.Д. 264, 596
Тюмченкова А.С. 514

-У-

Уколов Д.С. 348
Уманская С.Ф. 416
Ус Н.А. 208
Усевич Б.А. 328
Ушакова Е.В. 62

-Ф-

Фам А.Т. 564
Федоров А.В. 62, 108
Федоров В.А. 38
Федорова Я.В. 514
Фёдоров Д.Л. 480
Федорцов А.Б. 206
Филатов А.Л. 85
Флоря И.Н. 408
Фокина М.И. 46, 70
Фролов О.О. 508
Фролов С.В. 544
Фуров А.Н. 76

-Х-

Хабибуллин Р.А. 126
Хабибуллина Л.В. 472, 476

Хазвалиева Д.Р. 584
Хакимзянова Э.И. 570
Халилов С.И. 250, 520
Ханевич П.А. 592
Харасов Д.Р. 530
Хатырев Н.П. 97
Хафизов И.Ж. 106
Хомченко А.В. 200, 220
Хопёрский А.Н. 438
Хорьков К.С. 58
Храмов В.Н. 542
Худяков Д.В. 38
Худяков М.М. 188, 494
Хусяинов Д.И. 128

-Ц-

Царева А.М. 226
Цыганов И.К. 588

-Ч-

Чаймарданов П.А. 338
Чаповский П.Л. 130
Чарухчев А.В. 556
Чебурканов В.Д. 588
Чегнов В.П. 52
Чегнова О.И. 52
Черевков С.А. 62
Черёмхин П.А. 242, 590, 594, 598
Чернаков Д.И. 378
Черноок С.Г. 80
Черных В.Т. 268
Черных Д.А. 268
Черняк М.Е. 348, 498
Чесноков Н.Н. 204
Чехлова Т.К. 112, 138
Чехов А.Л. 122
Чечеткин И.А. 542
Чжун Л. 460
Чилегин А.А. 276
Чистоедова А.А. 410
Чистяков А.А. 210, 372, 484
Чичева П.А. 64
Чмерева Т.М. 392
Чубич Д.А. 148
Чудов К.А. 64
Чумаков А.И. 536
Чурбанова Е.С. 146

-Ш-

Шандаров В.М. 308
Шандаров С.М. 36, 48, 298, 304, 312
Шапиро Б.И. 56
Шарангович С.Н. 518
Шахно Е.А. 478
Шевкунов И.А. 568
Шеляков А.В. 532
Шепелевич В.В. 48
Шестакова А.П. 74
Шестериков А.В. 516
Шилова Г.В. 198, 490
Шилова И.В. 200
Ширяев В.С. 91
Шифрина А.В. 244, 598
Шихалиев И.И. 100
Шишканов О.Н. 538
Шкердин Г.Н. 89
Шмелин П.С. 64
Шмидт А.А. 48
Шохина Е.А. 64
Штанько А.Е. 160
Штарев Д.С. 34
Шугуров А.И. 124
Шульга А.В. 200
Шур В.Я. 36

-Щ-

Щербиков А.А. 236

-Э-

Эллерт О.Г. 424

-Ю-

Юрина У.В. 418
Юрченко Д.А. 426
Юсупов В.И. 146
Юшков К.Б. 83

-Я-

Яббарова Д.Р. 472, 476
Яворский М.А. 342, 520
Якуненко Р.Е. 70
Якунин В.П. 196
Якушенков П.О. 192
Яковлева Т.В. 332
Яковенко Н.А. 310, 316, 322
Ярославский И.В. 512
Яцук Р.М. 468
Ячменев А.Э. 126