

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

**VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,
2019. – 752 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 23-25 января 2019 г. в г. Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 1 декабря 2018 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2536-4

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2019

Подписано в печать 14.01.2019. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 47. Тираж 360 экз. Заказ №1.

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

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатели:

- Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
- 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
- Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва
- Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- Криштоп В.В. – Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
- Кульчин Ю.Н. – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики, Бишкек
- Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Маломед Б. – Тель-авивский университет, Израиль
- Манькин Э.А. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
- Одинокое С.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
- Потатуркин О.И. – Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Проклов В.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
- Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
- Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Твердохлеб П.Е. – Институт автоматизации 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

КАСТЕЛИК Ж.-К. Характеристизация длин волн перестраиваемого акустооптического интерферометра.....	31
ЛИНДЕ Б.Б.Ю. Экспериментальные исследования жидкостей акустическими и фотоакустическими методами.....	33
ПОПОВ С.М., БУТОВ О.В., КОЛОСОВСКИЙ А.О., ИСАЕВ В.А., ВОЛОШИН В.В., ВОРОБЬЁВ И.Л., ВЯТКИН М.Ю., ФОТИАДИ А.А., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К. Оптические волокна с массивами брэгговских решеток для задач фотоники.....	35
ДЕДИУ В.А., БЕРЖЕНТИ И. Спин-поляризованные электроды для органических светоизлучающих диодов.....	37
ЮШКОВ К.Б., ШАМПАТЬ Ж., МОЛЧАНОВ В.Я. Визуализация фазовых объектов гиперспектральным акустооптическим методом.....	39
БОРИТКО С.В., КАРАНДИН А.В. Использование акустооптической дифракции при резком периодическом переключении фазы управляющего напряжения для дифференциальной спектроскопии.....	41
КОТОВ В.М., ШКЕРДИН Г.Н., АВЕРИН С.В. Импульсная модуляция многоцветного излучения посредством акустооптической брэгговской дифракции.....	43
КУПРЕЙЧИК М.И., БАЛАХШИЙ В.И. Исследование областей акустооптического взаимодействия с низкой угловой и частотной селективностью дифракции в периодически неоднородном акустическом поле в двуслоных кристаллах.....	45
ПРОКЛОВ В.В., ЛУГОВСКОЙ А.В. О методе дистанционной идентификации удаленных объектов на основе согласованной акустооптической фильтрации спектральных сигналов.....	47
МАЧИХИН А.С., КОЗЛОВ А.Б., ХОХЛОВ Д.Д., ПОЖАР В.Э., БОРИТКО С.В. Исследование функции пропускания широкоапертурного акустооптического фильтра в режиме линейной частотной модуляции.....	49
РОГОЖНИКОВ Г.С., РОМАНОВ В.В., ЮШКОВ К.Б. Распределенная сеть защищенной оптической связи в свободном пространстве.....	51
АРТЕМОВ Е.В., КОПАЕВ И.А., НАНИЙ О.Е., ТРЕЩИКОВ В.Н. Импульсный электрооптический составной модулятор со сдвигом частоты.....	53

ТЕЛЕШЕВСКИЙ В.И., БУШУЕВ С.В., ГРИШИН С.Г. Способ электронного управления фазовым сдвигом в лазерных измерительных интерференционных системах.....	55
ПОДЛЕСНАЯ А.С., ЛУКИНЫХ С.Н., НАНИЙ О.Е., ТРЕЩИКОВ В.Н. Исследование перекрестных линейных помех в волоконных оптических линиях связи.....	57
ИВАНОВ С.И., ЛАВРОВ А.П., САЕНКО И.И. Расширение возможности пеленгации источников широкополосных сигналов в радиофотонном диаграммоформирующем устройстве линейной ФАР.....	59
ЗЕМЦОВ Д.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ХАФИЗОВ И.Ж. Обработка данных фотонного аналого-цифрового преобразователя с псевдослучайной выборкой.....	61
ДЕГТЕРЕВ А.Э., ЕРЕМЕЕВ М.А., МИХАЙЛОВ И.И., ЛАМКИН И.А., ТАРАСОВ С.А. Светоизлучающие структуры, содержащие органические слои и коллоидные квантовые точки.....	63
ГОРБЯК В.В., СИДОРОВ А.И. Самофокусировка непрерывного лазерного УФ-излучения в серебросодержащем силикатном стекле.....	65
ЕЛОПОВ А.В., КАРПОВ О.Н., ЗАЙЦЕВ В.Б., ЖИГУНОВ Д.М., ШАНДРЮК Г.А., ЕЖОВ А.А., МЕРЕКАЛОВ А.С., ГОЛОВАНЬ Л.А. Спектры и кинетика фотолюминесценции квантовых точек селенида кадмия, внедренных в жидкокристаллическую полимерную матрицу.....	67
МИСЬКЕВИЧ А.И., ПОДКОПАЕВ А.В. Люминесцентные характеристики Ag-Xe-C ₂ HBrClF ₃ плотной газовой среды при возбуждении осколками деления урана 235.....	69
СМИРНОВ М.С., БУГАНОВ О.В., ТИХОМИРОВ С.А., ОВЧИННИКОВ О.В., ЗВЯГИН А.И., ГРЕВЦЕВА И.Г. Фемтосекундная динамика электронных возбуждений в гибридных ассоциатах на основе коллоидных квантовых точек CdS.....	71
КОРШУНОВ В.М., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ТАЙДАКОВ И.В., ГОРЯЧИЙ Д.О. Влияние степени фторированности лигандного окружения на люминесценцию органических комплексов иона Eu(III).....	73
ЗВЯГИН А.И., ПЕРЕПЕЛИЦА А.С., СМИРНОВ М.С., ОВЧИННИКОВ О.В. Нелинейно-оптические свойства ассоциатов коллоидных квантовых точек Zn _{0.5} Cd _{0.5} S и молекул азур А.....	75
СОКОЛОВСКАЯ О.И., ТКАЧЕНКО Н.Б. Влияние упругого рассеяния света на время жизни фотонов и эффективность комбинационного рассеяния света в суспензии.....	77
ЕПИФАНОВ Е.О., ШУБНЫЙ А.Г., МИНАЕВ Н.В. Получение наночастиц серебра методом лазерной абляции в среде сверхкритического CO ₂ и их внедрение в пористые материалы.....	79

ИВАНОВА А.К., ИОНИН А.А., КУДРЯШОВ С.И. Формирование гибридных наночастиц кремний-золото методом наносекундной лазерной абляции в жидкости.....	81
ШУБНЫЙ А.Г., ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., ЦВЕТКОВ М.Ю. Микроструктурирование оптических материалов методом жидкостного лазерно-индуцированного травления.....	83
МКРТЫЧЕВ О.В. Исследование взаимодействия излучения с системой плоскопараллельных слоёв с помощью рекуррентных уравнений.....	85
ПОПОВА А.В., ГОНЧАРОВА П.С., СЮЙ А.В., ЛИВАШВИЛИ А.И., КИРЕЕВА Н.М., САВИЧ Д.Е., КРИШТОП В.В. Экспериментальное определение толщины кристаллических пластинок по интерференционной картине в белом свете.....	87
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., КОЛЕСНИКОВ А.И., ИВАНОВА А.И. Влияние нагрева на рельеф поверхности и оптическое пропускание монокристаллов германия.....	89
АЛЕШИНА Л.А., СИДОРОВА О.В., КАДЕТОВА А.В., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Обусловленная дефектами сверхструктура в нелинейно-оптических кристаллах ниобата лития.....	91
АРТЕМОВ Д.Е., ЩЕТИНИН А.В., НАНИЙ О.Е., ТРЕЩИКОВ В.Н. Влияние поляризации оптической несущей на работу электрооптического модулятора Маха-Цендера на ниобате лития.....	93
МОЛЧАНОВА А.Д., КУЗЬМИН Н.Н., БОЛДЫРЕВ К.Н. Исследование спектров поглощения метабората меди CuB_2O_4 в магнитных полях геометрии Фарадея.....	95
ДОЛГАНОВ П.В., БАКЛАНОВА К.Д., ДОЛГАНОВ В.К. Спектральные характеристики одномерных и трехмерных жидкокристаллических фотонных кристаллов.....	97
МАЩЕНКО В.И., СИТНИКОВ Н.Н., ЕРМАКОВА М.В., ХАБИБУЛЛИНА И.А., ШЕЛЯКОВ А.В., БЕЛЯЕВ В.В. Жидкокристаллические композиты на основе боросилоксановых гелей.....	99
ЖЕВАЙКИН К.Е., ДЕНИСЮК И.Ю., ФОКИНА М.И. Исследование влияния фотодеградации на интенсивность генерации второй гармоники органических нелинейно-оптических СО-кристаллов аминопиридин-нитрофенол.....	101
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В., БАДИКОВ В.В., БАДИКОВ Д.В. СО-лазер с многокаскадным внутри- и внerezонаторным широкополосным преобразованием частоты в кристаллах $BaGa_2GeSe_6$ (1,7–6,0 мкм).....	103

ИЛЬИНА К.Б., БОЙКОВА А.С., МАРЧЕНКОВА М.А., КОНАРЕВ П.В., ДЬЯКОВА Ю.А., ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., КОВАЛЬЧУК М.В. Влияние замены растворителя – H ₂ O на D ₂ O – на образование олигомеров в растворе лизоцима при росте кристаллов тетрагональной сингонии.....	105
АНИКЕЕВА В.Е., БОЛДЫРЕВ К.Н., СЕМЁНОВА О.И. Структурные фазовые переходы в монокристаллах перовскита CH ₃ NH ₃ PbI ₃	107
БОЙКОВА А.С., ИЛЬИНА К.Б., МАРЧЕНКОВА М.А., СЕРЕГИН А.Ю., РОГАЧЕВ А.В., ДЬЯКОВА Ю.А., ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., КОВАЛЬЧУК М.В. Структурные особенности ленгмюровского слоя белка лизоцима, сформированного из полидисперсного раствора на поверхности жидкости.....	109
НИКОЛАЕВ Н.А., КУЗНЕЦОВ С.А. Терагерцовая метаповерхность с чувствительным к углу падения резонансом для исследования пленок субмикронной толщины.....	111
ЖУКОВА М.О., ГРАЧЁВ Я.В., КОВАЛЬСКА Е., ХОГАН Б., БАЛДЫЧЕВА А., ЦЫПКИН А.Н. Модифицированные двумерные материалы для терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени.....	113
ХУСЯИНОВ Д.И., БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д. Влияние избыточной энергии на генерацию терагерцевого излучения в твердом растворе InGaAs.....	115
ОСИПОВ Е.В., МАРТЫНОВ И.Л., КУЗИЩИН Ю.А., АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ЧИСТЯКОВ А.А. Оптически контролируемая термодесорбция с поверхности пористого кремния.....	117
АВДЕЕВА А.Ю., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В. Гибридные состояния в ограниченном металлическом слое фотонном кристалле с нанокompозитным дефектом.....	119
АЙВАЗЯН О.Л., ОВСЕПЯН Р.К. Фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе пленок оксида цинка.....	121
АЛИЕВ С.А., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К., ЗАЕВ Д.А. Исследования свойств модифицированных фотокатализаторов на основе диоксида титана.....	123
КОМИССАР Д.А., КРИВОВА Г.М., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., СТЕБУНОВ Ю.В., АРСЕНИН А.В. Оптические свойства оксида графена.....	125
БАЧИНИН С.В., ЛЕНТОВСКИЙ В.В. Исследование возможности инициирования взрывчатых веществ лазерным излучением.....	127
ПЕРЧЕНКО Е.М., САВИН К.А., АМАСЕВ Д.В. Экспериментальные исследования и численное моделирование импеданса полимерных систем с неорганическими наночастицами.....	129

БУХАРОВ Д.Н., АРАКЕЛЯН С.М., ГЕРКЕ М.Н. Моделирование оптических свойств островковой полупроводниковой пленки РbTe.....	131
КОРОЛЕВА А.В., ИЛЬИН А.С. Исследование оксида индия (III) In ₂ O ₃ , оксида цинка ZnO и их композитов методом ИК-фурье-спектроскопии.....	133
КОНИН Ю.А., ЩЕРБАКОВА В.А., ГАРАНИН А.И., НУРМУХАМЕТОВ Д.И., СТАРИКОВ С.С. Исследование температурной чувствительности волоконных рассеивателей.....	135
СТАРЫХ Д.Д., ШИХАЛИЕВ И.И., НАНИЙ О.Е., ТРЕЩИКОВ В.Н. Влияние характеристик волокна на максимальную безрегенерационную дальность передачи.....	137
БОГАЧКОВ И.В. Особенности рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в эрбиевых оптических волокнах.....	139
ЯНУКОВИЧ Т.П., ПОЛЯКОВ А.В. Математическая модель распределенного оптоволоконного сенсора силы тока на основе деформации.....	141
НИКОЛАЕВ Н.Э., ПАВЛОВ С.В., ЧЕХЛОВА Т.К. Температурные свойства многослойных оптических волноводов с использованием золь-гель материалов.....	143
ПОПОВ М.Е., МИТЕТЕЛО Н.В., МАМОНОВ Е.А., ЖДАНОВА К.Д., МУРЗИНА Т.В. Нелинейно-оптическая микроскопия органических волноводов.....	145
ЮШКЕВИЧ В.В., ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., ДИДЕНКО Н.В. Фемтосекундный оптический параметрический усилитель для лазерной диагностики полупроводниковых структур.....	147
ЛОТКОВ Е.С., БАБУРИН А.С., РЫЖИКОВ И.А., РОДИОНОВ И.А., ПАНФИЛОВ Ю.В. Осаждение сверхтонких пленок ITO электронно-лучевым испарением для применений в интегрированной инфракрасной фотонике.....	149
ШАПИРО Б.И., НЕКРАСОВ А.Д., МИНИНА Н.Е. Синтез светочувствительных слоев металлокомплексных агрегатов анионных полиметиновых красителей на прозрачных ITO-электродах.....	151
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А., ХАЗВАЛИЕВА Д.Р. Высокочастотные голографические решетки на слоях бихромированного желатина с использованием при обработке УФ-излучения.....	153
ПИЧУГИН И.С., ИГНАТЬЕВ А.И., ОРЕШКИНА К.В., НИКОНОРОВ Н.В. Модификация матрицы фототерморефрактивного стекла: технология, свойства, применение.....	155

КУЗЬМИН Д.В., ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., ОДИНОКОВ С.Б. Исследование экспозиционной характеристики ФТР-стекло при записи голографических и дифракционных элементов импульсным фемтосекундным лазером ближнего ИК-диапазона.....	157
АЛИЕВА Т., РОДРИГО Х.А., АНГУЛО М. Полиморфический пучок как инструмент оптической манипуляции на уровне микромира.....	159
ТОЛСТИК А.Л., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ГОРБАЧ Д.В., БОБКОВА М.В., ПЕКАРЕВИЧ В.В. Фазово-поляризационные преобразования световых пучков динамическими голограммами и жидкокристаллическими элементами.....	161
САЗОНОВ С.В. К теории волноводного распространения оптических солитонов.....	163
КАРПОВ С.Н., ПОСТИ И.М., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., ВОРОНОВА Н.М., ЛЕКСИН А.Ю., ПРОХОРОВ А.В. Цифровое проектирование и оптимизация параметров плазмонных схем обработки информации.....	165
ПОНОМАРЕВА Е.А., ПУТИЛИН С.Э., СМИРНОВ С.В., ШТУМПФ С.А., МЕЛЬНИК М.В., ИВЭН Е., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А., ЖАНГ К.-Ч. Исследование генерации терагерцового излучения при филаментации в жидкостях.....	167
НОВИКОВ В.Б., МАНЦЫЗОВ Б.И., МУРЗИНА Т.В. Генерация второй оптической гармоники при временном дифракционном делении лазерных импульсов в одномерных фотонных кристаллах в геометрии Лауэ.....	169
МАЙМИСТОВ А.И., ЛЯШКО Е.И., ЕЛЮТИН С.О. Модуляционная неустойчивость нелинейных волн на поверхности топологического изолятора.....	171
ПЕТРОВ Н.И. Деполяризация излучения в градиентном световоде.....	173
ЛЬВОВ К.В., СТРЕМОУХОВ С.Ю., ПОТЕМКИН Ф.В. Влияние фокусировки на генерацию суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения.....	175
ВЕСЕЛКОВА Н.Г., МАСАЛАЕВА Н.И., СОКОЛОВ И.В. Рамановская квантовая память для света в резонаторной конфигурации вне приближения низкодобротного резонатора: эффект четырехволнового смешения.....	177
ЦВЕТКОВ Д.М., БУШУЕВ В.А., МАНЦЫЗОВ Б.И. Динамика распространения оптических импульсов в квази-РТ-симметричных диспергирующих фотонных кристаллах.....	179
ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н., МАКАРОВА К.А. Рассеяние аттосекундного импульса электромагнитного поля при взаимодействии с динамической системой, совершающей резонансную перезарядку протона на атоме водорода.....	181

КАЗАНЦЕВА Е.В.

Динамический отклик поляризации тонкой сегнетоэлектрической плёнки и сегнетоэлектрического слоя в параэлектрике на электрическое поле ультракороткого электромагнитного импульса.....183

МАЛИКОВ Р.Ф., РЫЖОВ И.В., МАЛЫШЕВ А.В., МАЛЫШЕВ В.А.

Нелинейный оптический отклик монослоя Λ -излучателей: мультистабильность и автоколебания.....185

ГОШЕВ А.А., ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н., ЮЛКОВА В.М.

Ориентационные эффекты при взаимодействии аттосекундного импульса электромагнитного поля с молекулярными анионами.....187

КОРОЛЕВ С.Б., ГОЛУБЕВА Т.Ю., ГОЛУБЕВ Ю.М.

Критерий оценки минимального сжатия для генерации квантовых кластерных состояний.....189

КОЛЯДИН А.Н., КОСОЛАПОВ А.Ф., БУФЕТОВ И.А.

Распространение оптического разряда по полым револьверным световодам под действием лазерного излучения.....191

АНАНЬЕВ В.А., ДЕМИДОВ В.В., ЛЕОНОВ С.О., АЛАГАШЕВ Г.К.,

ЕЛИСТРАТОВА Е.А., МАТРОСОВА А.С., НИКОНОВ Н.В.

Одномодовые полые антирезонансные волокна с сердцевинной диаметром 50 мкм и оболочкой на основе восьми соприкасающихся капилляров.....193

АГАФОНОВА С.Е., ВОЛОШИН А.С., ГОРОДНИЦКИЙ А.С., ШИТИКОВ А.Е.,

ГОРОДЕЦКИЙ М.Л.

Эффект затягивания и генерация оптических гребёнок в интегральном микрорезонаторе из нитрида кремния.....195

СОФИЕНКО Г.С., КОЛЕГОВ А.А., ЗАГИДУЛИН А.В., БОЧКОВ А.В.,

НЕСТЕРОВ В.А.

Волоконный одночастотный лазер для интерферометрических измерений...197

ЛЕБЕДЕВ В.Ф., ПАВЛОВ К.В., БУРКОВСКИЙ Г.В., ФЕДИН А.В.

Компактная лазерная система для дистанционных измерений методом ЛИЭС на основе Nd:YAG-лазера с самообращением волнового фронта.....199

ШИТИКОВ А.Е., ЛОБАНОВ В.Е., ТЕРЕНТЬЕВ Р.В., БИЛЕНКО И.А.,

ГОРОДЕЦКИЙ М.Л.

Экспериментальное исследование методов генерации платиконов.....201

БУРДУКОВА О.А., ДОЛОТОВ С.М., ПЕТУХОВ В.А., СЕМЕНОВ М.А.

Полимерный лазер на красителях с накачкой 520 нм лазерными диодами.....203

БАСТАМОВА М.А., ЛЕОНОВ С.О., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.,

ГОРЕЛИК В.С.

Нелинейные преобразования фемтосекундного излучения в керамике LiTaO_3205

ЖИГАРЬКОВ В.С., ЗАРУБИН В.П., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И.

Эффекты, влияющие на выживание биологических организмов, при проведении лазерной печати гелевых микрокапель.....207

СЕМЕНОВ В.Г., МИЛИКОВ Э.А., МОРОЗОВ А.Д., ТАРАСЕНКО А.Б. Влияние внутренних параметров земановского четырехчастотного лазерного гироскопа на характеристики газового разряда.....	209
АРШИНОВА И.Д., БОБРОВ А.А., ВИЛЬШАНСКАЯ Е.В., СААКЯН С.А., САУТЕНКОВ В.А., ЗЕЛЕНЕР Б.Б. Приготовление ультрахолодного газа атомов кальция-40.....	211
ЗЕМЛЯНОВ А.А., ТРИФОНОВА А.В., РЯМБОВ Р.В. Влияние эффекта плазмонного резонанса на пороги лазерной генерации в активной среде с наночастицами Au, Ag, Pt.....	213
ВИШНЯКОВ Е.А., КОЛЕСНИКОВ А.О., РАГОЗИН Е.Н., ШАТОХИН А.Н. VLS-спектрометры высокого разрешения для мягкого рентгеновского излучения.....	215
КОМОЦКИЙ В.А., СОКОЛОВ Ю.М., СУЕТИН Н.В., ПАУЙАК Х.А. Фильтрующие свойства глубокой рельефной периодической отражающей структуры.....	217
ДЕНИСОВ Д.Г., ЛЮЙ П.Ц. Исследование методических и инструментальных погрешностей восстановления параметров шероховатости субнанометрового уровня профилей оптических деталей.....	219
ДЕГАДНИКОВА Л.А., ОСИНЦЕВ А.В. Применение метода цифровой корреляции изображений для определения упругих постоянных материалов.....	221
ДЕНИСОВ Д.Г., ПРОСОВСКИЙ Ю.О., ПРОСОВСКИЙ О.Ф. Анализ погрешностей перспективной системы прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий.....	223
МИНАЕВ В.Л., МИНЬКОВ К.Н., ВИШНЯКОВ Г.Н., ЛЕВИН Г.Г. Интерференционный оптический томограф для измерения пространственного распределения показателя преломления стекловолокон..	225
ЗЫКОВА Л.А., БУРМАК Л.И. Спектрально-интерференционный модуль на основе акустооптической фильтрации для измерения пространственного распределения оптических характеристик объектов.....	227
ТЕЛЕСЕВСКИЙ В.И., СКРЫННИК А.А. Лазерная импульсная интерференционная система, работающая в среднем ИК-диапазоне для измерения геометрических параметров объекта.....	229
ПАРШИН В.А., ЕВТИХИЕВА О.А., БЛИЗНЮК В.В. Моделирование пространственно-энергетической и поляризационной структуры излучения в свободное пространство одномодовых лазерных диодов.....	231
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., МУЛИН П.В., ВИН Й.Н. Компенсация влияния линейного ускорения на преобразователь угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта.....	233

САПРОНОВ М.В., СКОРНЯКОВА Н.М. Трехмерная визуализация индикатрис рассеяния света в рамках теории Ми.....	235
БУСУРИН В.И., КУДРЯВЦЕВ П.С., ЛЮ Ч. Исследование влияния скорости сканирования на качество измерения бесконтактного профилометра.....	237
БЫКОВСКИЙ А.Ю. Модель случайного предсказателя в оптоэлектронных схемах криптографической защиты.....	239
ПАВЛОВ А.В., РОЗАНОВ А.М. Моделирование функционального механизма когнитивных нарушений методом голографии Фурье.....	241
БОЛОТОВА А.А., ПУТИЛИН А.Н. Угол поля зрения в устройствах дополненной реальности на основе световодов с пикопроекторным источником изображения.....	243
ПИСКУНОВ Д.Е., НОСОВ П.А., БАТШЕВ В.И., ЯБЛОКОВА А.А. Расчёт оптических вариосистем с жидкими линзами.....	245
РУСАКОВА М.С., ВОЛОСТНИКОВ В.Г., КОТОВА С.П., КИШКИН С.А. Анализ кардиограмм с помощью математического аппарата спиральных пучков света.....	247
БАБАНИН Е.А., БЛАНК А.В., СУХАРЕВА Н.А. Управление профилем волнового пучка на выходе децентрированной оптической системы.....	249
БЕЛАШОВ А.В., ШЕВКУНОВ И.А., НАЛЕГАЕВ С.С., ПУТИЛИН С.Э., ЛИН Й.-Ч., ЧЖЭН Ч.-Ж., ПЕТРОВ Н.В. Численное моделирование неколлинеарной вырожденной фазовой модуляции в среде с пространственной неоднородностью нелинейного показателя преломления.....	251
ТАЛАЙКОВА Н.А., РЯБУХО В.П. Расчет оптимальных параметров оптической системы для формирования опорной волны в методе дифракционной фазовой микроскопии.....	253
БАБАНИН Е.А., БЕККИЕВ К.М., БЛАНК А.В., НАСОНОВ А.А. Дифференциальная геометрия профиля распределения интенсивности одномодового и многомодового волновых пучков.....	255
БОРОДИН А.Н. Уменьшение рассеянного света солнечных телескопов с сидеростатом.....	257
УС Н.А., АВЕРШИН А.А., ЖИГАЛОВ В.А. Матричное описание оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа.....	259
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С. Фазовый ПВМС как устройство ввода изображений в инвариантный оптико-цифровой коррелятор.....	261

КАЙТУКОВ Ч.Б., ЯНОВСКИЙ А.В. Метод оптоэлектронного анализа пространственного спектра Фурье для контроля подлинности защитных голограмм.....	263
ПУТИЛИН А.Н., МОРОЗОВ А.В., ДРУЖИН В.В., МАЛИНИНА П.И., БОЛОТОВА А.А., КОПЁНКИН С.С., ДУБЫНИН С.Е., БОРОДИН Ю.П., ПЕРЕВОЗНИКОВА А.С., ЛЬВОВА К.И. Оптическая система очков дополненной реальности с большим полем зрения на основе голографического оптического элемента.....	265
АКИМОВА Я.Е., БРЕЦЬКО М.В., ХАЛИЛОВ С.И., ТИТОВА А.О., КУДРЯН Н.В. Измерения спектра оптических вихрей с помощью моментов интенсивности.....	267
ПАВЛОВ П.В., ВОЛЬФ И.Э., МОСКВИН Н.В. Опико-электронный комплекс неразрушающего контроля авиационных материалов.....	269
БОРИСОВ В.Н., ЛЕСНИЧИЙ В.В., ДЮРЯГИНА А.Б., ШУРЫГИНА Н.А., ВЕНИАМИНОВ А.В. Комбинированная многокомпонентная модель процессов фотополимеризации, диффузии и усадки в ходе голографической записи.....	271
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И. Усиление голографических рельефных решеток, записанных в слоях фотосшиваемых полимеров.....	273
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х. Температурный режим проявления скрытого изображения голографической записи на фототермопластических носителях.....	275
КАМЕНЕВ В.Г., КАМЕНЕВА Н.А. Моделирование в среде ZEMAX и экспериментальная обработка телецентрической системы для регистрации цифровых голограмм.....	277
ИВАНОВ П.А. Корреляционные фильтры Калмана в задачах распознавания изображений..	279
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С. Исследование бинарного представления голограмм инвариантных корреляционных фильтров в задачах распознавания образов.....	281
САРЫБАЕВА А.А. Оценка эффективности методов оптического распознавания изображений.....	283
МИНАЕВА Е.Д., КРАСНОВ В.В., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А., ШИФРИНА А.В. Анализ методов синтеза фазовых дифракционных оптических элементов для задачи восстановления трехмерных сцен.....	285
СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., БОБРЕВА Л.А., КЛИМИН С.А. Комплексные дефекты в стехиометрических кристаллах ниобата лития.....	287

САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., МАНДЕЛЬ А.Е., НОРМАТОВ А.Ж., ЭРГАШЕВ Ж.Т., АХМАТХАНОВ А.Р., ШУР В.Я.	
Брэгговская дифракция света на периодической доменной структуре с наклонными доменными стенками в кристалле ниобата лития.....	289
АНТОНЬЧЕВА Е.А., СЮЙ А.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н.	
Фоторефрактивное рассеяние света в кристаллах ниобата лития, легированных двойными примесями.....	291
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н.	
Контроль оптической однородности сильно легированных кристаллов LiNbO ₃ :Zn.....	293
КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М., КОКАНЯН Э.П.	
Определение фазового состава протонно-обменных волноводов в кристаллах LiNbO ₃	295
ПОПОВ В.В., МЕНУШЕНКОВ А.П., МОЛОКОВА А.Ю., БОЙКО Н.В., ХРАМОВ Е.В., ЩЕТИНИН И.В., ЖЕЛЕЗНЫЙ М.В., ПОНКРАТОВ К.В., КУРИЛКИН В.В., ЦАРЕНКО Н.А., АРЖАТКИНА Л.А.	
Синтез и исследование кристаллической, локальной и электронной структур титанатов европия Eu ₂ Ti ₂ O ₇ и EuTiO ₃	297
БОЛДЫРЕВ К.Н., МОЛЧАНОВА А.Д., КУЗЬМИН Н.Н.	
Электронно-колебательные спектры монокристалла CuV ₂ O ₄	299
КНЯЗЬКОВ А.В.	
Определение ориентации оптической оси одноосных кристаллов и напряженных материалов по отражению поляризованного света.....	301
ПЕРИН А.С.	
Формирование одномерного светлого пространственного солитона в объеме ниобата лития с учетом вклада пирозлектрического эффекта.....	303
ПРОКОПИВ Н.Н., СЮЙ А.В., СУРИЦ В.В.	
Автоматизированная установка для определения электрооптических коэффициентов кристаллов ниобата лития.....	305
МАКСИМЕНКО В.А.	
Спекл-структура картины фотоиндуцированного рассеяния света в кристалле LiNbO ₃ :Rh.....	307
КИСТЕНЕВА М.Г., СИМ Е.С., ШАНДАРОВ С.М., МЕЗЕНЦЕВ Р.В., КАРГИН Ю.Ф.	
Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристалле Vi ₁₂ TiO ₂₀ :Cd.....	309
МАМОНОВ Е.А., РАСПУТНЫЙ А.В., КОПЫЛОВ Д.А., МУРЗИНА Т.В.	
Исследование генерации яркого сжатого вакуума в нелинейных кристаллах под действием мощного фемтосекундного излучения.....	311
БУДКИН И.В., КЛИМИН С.А., БАДИКОВ Д.В., БАДИКОВ В.В.	
ИК активные фононы нелинейного кристалла BaGa ₂ GeSe ₆	313

ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., САГИТОВА А.М., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., СИНИЦЫН Д.В. Генерация излучения с длиной волны до ~ 20 мкм путем смещения частот излучения щелевых СО- и СО ₂ -лазеров в нелинейном кристалле РbIn ₆ Te ₁₀	315
ЗОЛИНА К.А., ГАРИФУЛЛИН А.И., ГАЙНУТДИНОВ Р.Х., ХАМАДЕЕВ М.А. Исследование зонной структуры фотонного кристалла на основе метаматериала с ультравысоким показателем преломления.....	317
ПРУДНИКОВ И.Р. Дифракция различно поляризованных световых волн в 1-D фотонном кристалле с внедренными ультратонкими слоями.....	319
АНДРЕЕВА К.А., БИКМУХАМЕТОВ Р.И., ГАРИФУЛЛИН А.И., ГАЙНУТДИНОВ Р.Х., ХАМАДЕЕВ М.А. Спектры пропускания одномерных фотонных кристаллов на основе метаматериалов с ультравысоким показателем преломления.....	321
СТРОКОВА Ю.А., СВЯХОВСКИЙ С.Е., САЛЕЦКИЙ А.М. Спектральная и угловая зависимость кинетики тушения люминесценции молекул донора в одномерном фотонном кристалле.....	323
СИТНИКОВ Н.Н., ШЕЛЯКОВ А.В., ХАБИБУЛЛИНА И.А., СУНДЕЕВ Р.В. Особенности термической кристаллизации аморфных сплавов TiNiCu с высоким содержанием меди.....	325
АНТОНЫЧЕВА Е.А., ДОЛГОПОЛОВ И.С., ПЕТРОВА М.С., ПРОКОПИВ Н.Н., СЮЙ А.В. Автоматизированная установка для изучения зависимости двулучепреломления анизотропных оптически активных сред от внешнего электрического поля.....	327
АЛИЕВ С.А., РАВИН А.Р., ПАХЛАВОНОВА К.Д., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К. Калькулятор расчета оптических параметров трехслойной тонкопленочной структуры по результатам измерений коэффициентов замедления волноводных мод.....	329
ВЕКШИН М.М., КУПЛЕВИЧ М.А., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Исследование одномодовых на длине волны 1,55 мкм оптических волноводов в стекле, изготовленных ионным обменом K ⁺ -Na ⁺	331
ПРЖИЯЛКОВСКИЙ Я.В., СТАРОСТИН Н.И., ГУБИН В.П., МОРШНЕВ С.К. Волоконно-оптический датчик токовых импульсов.....	333
ГАВРУШКО В.В., ИОНОВ А.С., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А. Токовая чувствительность дифференциальных фотоприемников на основе кремния.....	335
МОРШНЕВ С.К., ГУБИН В.П., СТАРОСТИН Н.И., ПРЖИЯЛКОВСКИЙ Я.В., САЗОНОВ А.И. Осцилляции контраста отражательного волоконного интерферометра датчика тока.....	337

ХАЛИЛОВ С.И., РЫБАСЬ А.Ф., СОКОЛЕНКО Б.В., АКИМОВА Я.Е., БРЕЦЬКО М.В.	
Вихревой состав поля навитого маломодового волокна.....	339
БОГАЧКОВ И.В., ТРУХИНА А.И.	
Определение типа оптического волокна по спектру рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.....	341
УКОЛОВ Д.С., ЧЕРНЯК М.Е., МОЖАЕВ Р.К., ПЕЧЕНКИН А.А.	
Исследование затухания оптического сигнала в одномодовом радиационно стойком оптоволокне при разных мощностях воздействия гамма-излучения.....	343
АЛЕКСЕЕВ К.Н., БАРШАК Е.В., ВИКУЛИН Д.В., ЛАПИН Б.П., ЯВОРСКИЙ М.А.	
Дисперсия мод высших порядков оптических волокон с градиентным профилем.....	345
БОГАЧКОВ И.В., ТРУХИНА А.И.	
Ранняя диагностика предаварийных участков в оптических волокнах.....	347
ХАРАСОВ Д.Р., ФОМИРЯКОВ Э.А., ЛУКАШОВА Т.О.	
Фазочувствительный рефлектометр с оптимизированным распределённым ВКР-усилителем.....	349
БУРДИН В.А., БУРДИН А.В.	
Дисперсионные характеристики мод LP ₀₁ и LP ₁₁ ступенчатого волоконного световода с керровской нелинейностью.....	351
МОРОЗОВ О.Г., КУЗНЕЦОВ А.А., НУРЕЕВ И.И., САХАБУТДИНОВ А.Ж.	
Адресные волоконные решетки с единой длиной волны Брэгга.....	353
ЧАЙМАРДАНОВ П.А.	
Разработка программного обеспечения для имитационного моделирования волоконно-оптических систем передачи.....	355
БОГАЧКОВ И.В.	
Изучение бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон различных типов с нагретыми участками.....	357
МАКОВЕЦКИЙ А.А., ЗАМЯТИН А.А., РЯХОВСКИЙ Д.В.	
Оптические свойства многомодового кварцевого оптического волокна с рассеивающей светоотражающей оболочкой.....	359
БЫЛИНА М.С., ГЛАГОЛЕВ С.Ф., ДОЦЕНКО С.Э.	
Возможности реализации квазисолитонных волоконно-оптических систем связи.....	361
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И.	
Модуляционная неустойчивость волновых пакетов, распространяющихся в неоднородных световодах.....	363
ПЕТРОВ Н.И.	
Угловая расхожимость частично-когерентного пучка света.....	365

СОКОЛЕНКО Б.В., ШОСТКА Н.В., КАРАКЧИЕВА О.С., ПОЛЕТАЕВ Д.А., ХАЛИЛОВ С.И.	
Эволюция фазовых сингулярностей при трехлучевой внеосевой интерференции когерентных пучков.....	367
ПРОКЛОВ В.В., РЕЗВОВ Ю.Г.	
Условие инвариантности акустооптической функции пропускания при изменении акустического сноса в плоскости акустооптического взаимодействия.....	369
ВЕКШИН М.М., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А.	
Реконструкция параметров ионного обмена в стекле К-8.....	371
МОСЕНЦОВ С.Н., ОСЬМАКОВ И.А.	
Проектирование квазираспределённого спектроанализатора.....	373
ИЗМАЙЛОВ И.В., ПОЙЗНЕР Б.Н., СОСНИН Э.А.	
Форма оптического сигнала задаёт вид передаточной характеристики низкочастотного нелинейного элемента.....	375
ЗЕМЦОВ Д.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ХАФИЗОВ И.Ж.	
Использование радиофотонного преобразователя частоты для оценки частотного состава широкополосного радиосигнала.....	377
ШАРОГЛАЗОВА В.В., ЕРМАКОВ Р.П., КУРОЧКИН В.Л., КУРОЧКИН Ю.В.	
Квантовый генератор случайных чисел, основанный на колебаниях вакуума электромагнитного поля в полости импульсного лазерного диода.....	379
ПЛЁНКИН А.П., КУРТИШОВ И.А., НГУЕН Б.Х., АНТОНЦОВ М.А.	
Квантовое распределение ключа в структурированных кабельных системах.....	381
ВОРОНЦОВА И.О., МЕЛЬНИК М.В., ПУТИЛИН С.Э., ЦЫПКИН А.Н., КОЗЛОВ С.А.	
Анализ метода Z-сканирования для малопериодных терагерцовых импульсов.....	383
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	
Бинокль круглосуточного действия с дистанционной передачей изображения.....	385
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	
Комбинированный дневно-ночной прицельный комплекс.....	387
АГРИНСКИЙ М.В., ГОЛИЦИН А.В., СТАРЦЕВ В.В.	
Гиперспектральная камера с применением оптических жидких сред с «особым» ходом дисперсии.....	389
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д.	
Теплотелевизионные биноклярные очки ночного видения.....	391
КУЛЬЧИЦКИЙ Н.А., НАУМОВ А.В., СТАРЦЕВ В.В.	
Развитие рынка неохлаждаемых микроболометров в мире и России.....	393

ДЯГИЛЕВА Д.В., КРИВЕНКОВ В.А., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р., РАКОВИЧ Ю.П.	
Люминесцентные свойства гибридного материала на основе полупроводниковых нанокристаллов и золотых наностержней при двухфотонном возбуждении.....	395
АГАФОНОВА Д.А., БАБКИНА А.Н., СОБОЛЕВ Д.И., МОСКАЛЕВА К.С., НУРЫЕВ Р.К.	
Влияние лития на люминесцентные свойства боратной стеклокерамики с хромом.....	397
АЛЕКСЕЕВ Ю.Л., БЕЛОВ П.А.	
Изучение связи люминесценции и кислородной емкости крови в приборе пульсоксиметр.....	399
ОРЕШКИНА К.В., ДУБРОВИН В.Д., ИГНАТЬЕВ А.И., ПИЧУГИН И.С.	
Спектрально-люминесцентные свойства хлоридных фототерморефрактивных стекол с различными щелочными ионами в составе.....	401
КУЧЕРЕНКО М.Г., НАЛБАНДЯН В.М.	
Трансформация спектров люминесценции квантовых точек вблизи плазмонных наночастиц в магнитном поле.....	403
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., ДЗЯДУХ С.М., КОХАНЕНКО А.П., ДИРКО В.В., ЛОЗОВОЙ К.А.	
Электрофизические и излучательные свойства органических светодиодных структур с эмиссионным слоем Alq ₃	405
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П.	
Электрохемилюминесценция металлических анодов в дистиллированной воде.....	407
ПАВЛОВА М.Д., ЛАМКИН И.А., ТАРАСОВ С.А.	
Исследование влияния толщины активных слоев на спектры фоточувствительности структур на основе системы ZnPc:C ₆₀	409
ДМИТРИЕВ А.Д., САЛЕЦКИЙ А.М.	
Плазмонно-связанное излучение на тонких никелевых пленках.....	411
ЧЕРНОВ А.И., ФЕДОТОВ П.В., ОБРАЗЦОВА Е.Д.	
Оптическое поглощение молекул фталоцианина кобальта при помещении внутрь одностенных углеродных нанотрубок.....	413
МЯГОТИН А.В., ИВАНОВА Г.Д.	
Светоиндуцированная термодиффузия в двухкомпонентной жидкости.....	415
ЕГОРЫШЕВА А.В., ДУДКИНА Т.Д., РЯБОЧКИНА П.А., ГОЛОДУХИНА С.В., ХРУЩАЛИНА С.А., ЮРЛОВ И.А., ТАРАТЫНОВА А.Д.	
Новые оптические материалы на основе сложных оксидов LnGa _{0,5} Sb _{1,5} O ₆ со структурой розианта.....	417
ДРОНОВА М.Г., СЕМЕНЧА А.В.	
Влияние селена на свойства объемных покрытий (As ₃₃ S ₃₃ I ₃₃) _(1-x) -Se _x для ИК-диодов.....	419

ВАСИНА М.В., ЛАВРОВ С.Д., АВДИЖИЯН А.Ю., КУДРЯВЦЕВ А.В., ШЕСТАКОВА А.П., МИШИНА Е.Д. Исследование оптических свойств многослойных гетероструктур, основанных на дихалькогенидах переходных металлов.....	421
КРИВОВА Г.М., КОМИССАР Д.А., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., СТЕБУНОВ Ю.В., АРСЕНИН А.В. Технология получения тонких пленок оксида графена методом воздушно-капельного распыления.....	423
РОМАНОВ Н.Р., ЗОЛОТОВ Ф.И., СМИРНОВ К.В. Создание разупорядоченных ультратонких сверхпроводниковых пленок нитрида ванадия.....	425
АНТОНОВ Е.А., КАЛУГИН А.И., ПОНОМАРЕВ А.Г. Оптические спектры графита интеркалированного FeCl ₃	427
ЧИЧЕВА П.А., ЛЕВЧЕНКО К.С., ЧУДОВ К.А., ПОРОШИН Н.О., ШМЕЛИН П.С., ГРЕБЕННИКОВ Е.П. Синтез и исследование электрохимических свойств полимерных микросфер, модифицированных электрохромными соединениями.....	429
АВДИЖИЯН А.Ю., ЛАВРОВ С.Д., ШЕСТАКОВА А.П. Свойства экситонных состояний в твердых растворах дихалькогенидов переходных металлов.....	431
ЖЕЕНБАЕВ Н.Ж., ДОРЖУЕВА Г.Д., НУРСЕИТОВА А.М. Определение концентрации золота методом сцинтилляционного анализа в двухструйном плазматроне.....	433
МАШКО А.М., МЕЙСТЕРСОН А.А., АФАНАСЬЕВ А.Е., МЕЛЕНТЬЕВ П.Н., БАЛЫКИН В.И. Спектроскопия холодных атомов локализованных импульсным полем фемтосекундной длительности.....	435
МАКИН В.С., ЛОГАЧЕВА Е.И., МАКИН Р.С. Иерархия упорядоченного резонансного рельефа ZnO под действием УКИ линейно поляризованного лазерного излучения.....	437
ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г. Энергетическая релаксация квантовых точек с участием поверхностных плазмонов.....	439
КОНДРАТЕНКО Т.С., ЗВЯГИН А.И., ПЕРЕПЕЛИЦА А.С., СМИРНОВ М.С., ОВЧИННИКОВ О.В. Нелинейное поглощение и рефракция в коллоидных квантовых точках Ag ₂ S.....	441
ТЕПЛЯКОВ Н.В., БАЙМУРАТОВ А.С., БАРАНОВ А.В., ФЁДОРОВ А.В., РУХЛЕНКО И.Д. Оптические свойства квантовых точек хиральных форм.....	443
ВОЛОДИН Д.О., ЗВАЙГЗНЕ М.А., АЛЕКСАНДРОВ А.Е., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р. Тонкие пленки квантовых точек состава CdSe/ZnS/CdS/ZnS для применения в светодиодах.....	445

РУСИНОВ А.П.	
Определение нелинейно-оптических свойств водных растворов квантовых точек CdSe.....	447
СКОБЁЛКИНА А.В., КАШАЕВ Ф.В., КОЛЧИН А.В., ХИЛОВ А.В., КУРАКИНА Д.А.	
Применение кремниевых наночастиц, изготовленных методом лазерной абляции пористого кремния, в биофотонике.....	449
ЖУМАБАЙ Н.Д., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИБРАЕВ Н.Х.	
Влияние плазмонного резонанса наночастиц металлов на фотонику родаминового красителя в наноразмерных пленках.....	451
СЫРНИКОВ Д.А., КУРКОТОВ А.Д., КРЫЛОВ В.И.	
Осаждение наночастиц под действием светового давления.....	453
ИБРАЕВ Н.Х., АЙМУХАНОВ А.К.	
Влияние наночастиц Ag на свойства вынужденного излучения 5973 в этиловом спирте.....	455
ЗАБАЛУЕВА З.А., НЕПОМНЯЩАЯ Э.К., ВЕЛИЧКО Е.Н.	
Параметры схемы кросскорреляционного рассеяния для оценки размеров наночастиц.....	457
КОЛЧИН А.В., КАШАЕВ Ф.В., СКОБЁЛКИНА А.В., ШУЛЕЙКО Д.В., КАМИНСКАЯ Т.П., ПАВЛИКОВ А.В.	
Структурные свойства наночастиц, сформированных импульсной лазерной абляцией карбида кремния в жидкостях.....	459
САПАРИНА С.В., ХАРИНЦЕВ С.С.	
Характеризация углеродного нанопокртытия оптических волокон с помощью нового класса гибридных методов локально-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния света.....	461
УСТИНОВ А.С., ОСМИНКИНА Л.А., ЕФИМОВА А.И., ЗАБОТНОВ С.В., ГОЛОВАНЬ Л.А.	
Анизотропия третьей гармоники, генерируемой в массивах кремниевых нанонитей.....	463
МОШКОВА М.А., ДИВОЧИЙ А.В., МОРОЗОВ П.В., АНТИПОВ А.В., ВАХТОМИН Ю.Б., СМИРНОВ К.В.	
Характеризация сверхпроводниковых однофотонных детекторов с разрешением числа фотонов различных топологий.....	465
НЕЯСОВ П.П., АЛИМБЕКОВ И.Р., КУЧЕРЕНКО М.Г.	
Формирование импульсов кросс-аннигиляционной замедленной флуоресценции молекул в нанореакторах с частицами магнетита.....	467
КУЗНЕЦОВА О.Б., САВЧЕНКО Е.А., ВЕЛИЧКО Е.Н.	
Визуализация одиночных молекул методом флуоресцентной микроскопии в режиме полного внутреннего отражения.....	469
ГЕРАСИМОВ В.С., ЕРШОВ А.Е., БИКБАЕВ Р.Г., РАССКАЗОВ И.Л.	
Проявление аномалий Релея в гибридных плазмонно-фотонных структурах.....	471

ПЕНЬКОВ С.А., КУЧЕРЕНКО М.Г. Оптическое детектирование магнитного резонанса мобильных триплетных молекул в нанопорах с парамагнитными центрами.....	473
БИЛЫК В.Р., БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д., ГАЛИЕВ Г.Б., КЛИМОВ Е.А., МАЛЫЦЕВ П.П., ПУШКАРЁВ С.С. Плазмонные структуры на основе низкотемпературном арсениде галлия в качестве генераторов и детекторов терагерцового излучения.....	475
АКМАЛОВ А.Э., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КРЮКОВА И.С., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А. Исследование терагерцовых спектров отражения структур на основе слоёв пористого кремния.....	477
ГОРБАТОВА А.В., ВАСИНА М.В., ХУСЯИНОВ Д.И., БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д. Генерация терагерцового излучения с поверхности объемного и монослойного кристаллов WSe_2	479
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Универсальность взаимодействия интенсивного поляризованного терагерцового излучения с конденсированными средами.....	481
КУЧЕРЕНКО М.Г., ЧМЕРЕВА Т.М., НАЛБАНДЯН В.М. Магнитный круговой дихроизм спектров композитных наночастиц с экситоногенными компонентами.....	483
ЗАДОРОЖНЫЙ О.Ф., ДАВЫДОВ В.Н. Энергетический спектр треугольной квантовой ямы комбинированного профиля.....	485
ЖЕЕНБАЕВ Н.Ж., РЫСКУЛ КЫЗЫ ГУЛЬЗАТ, НУРСЕЙТОВА А.М. Высокочувствительный эмиссионный спектрометр для определения малых содержаний вещества.....	487
АГАФОНОВА Д.А., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С. Исследование спектральных свойств боратных стёкол, легированных ионами хрома.....	489
ГРИГОРЬЕВА А.А., ГОРБЯК В.В., СИДОРОВ А.И. Рамановская спектроскопия фототерморефрактивных стекол с серебром: влияние УФ-облучения и термообработки.....	491
БАБКИНА А.Н., АГАФОНОВА Д.А., КУЛЬПИНА Е.В., ЗЫРЯНОВА К.С., ОРЕШКИНА К.В. Магнитооптические фосфатные стекла, легированные тербием и церием.....	493
НАЗАРОВА Д.А., НЕМЦЕВ А.И., ПОДСВИРОВ О.А., СИДОРОВ А.И., ЮРИНА У.В. Модификация оптических свойств фосфатных стекол с высоким содержанием серебра посредством электронного облучения.....	495
НГО З.Т., НГО В.В., СИДОРОВ А.И. Рамановская спектроскопия фосфатных серебросодержащих стекол.....	497

НГО В.В., НГО З.Т., СИДОРОВ А.И. Формирование и исследование оптических свойств ориентированных серебряных наносфероидов в стекле.....	499
АШУРОВ М.С., ЕРЕМИНА Е.А., ЛАПТИНСКАЯ Т.В., КЛИМОНСКИЙ С.О. Формирование двухуровневых дифракционных структур из сферических микрочастиц полистирола.....	501
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н. Туннельная ионизация и подавление вынужденного комбинационного саморассеяния.....	503
ЯКУШЕНКОВ П.О. Диэлектрическая проницаемость с точки зрения общей теории относительности.....	505
АВЕРБУХ Б.Б., АВЕРБУХ И.Б. Распространение плоской электромагнитной волны в среде из линейных электрических квадрупольей.....	507
МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ Д.В. Возбуждение электронным ударом излучающих уровней конфигурации $4p^5 5p$ атома криптона.....	509
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., СУХОРУКОВА О.Б., КОНЕЕВ Р.В. Квадрупольная эмиссия при рассеянии двух фотонов атомом.....	511
БОРОВЫХ С.В., СМИРНОВ В.В. Расчёт деградации картины дифракции мощного, ультракороткого рентгеновского излучения на молекуле водорода.....	513
ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В., ВИНОГРАДОВА П.В., ЯЦУК О.И. Нелинейный отклик наножидкости на воздействие светового поля.....	515
АРХИПОВ Д.Н., БОРОВЫХ С.В., КОЖИНА А.С., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В. Оценка вероятности фотоионизации атома лития в ультракоротком лазерном поле.....	517
СЕМЕНОВА Л.Е. Гиперкомбинационное рассеяние света на LO-фононах при двухфотонном возбуждении вблизи края поглощения в кристалле CdS.....	519
БЕЗРУКОВ А.Д., ОКИШЕВ К.Н. Термолинзовый отклик тонкопленочного зеркала.....	521
АСТАШКЕВИЧ С.А. Точный численный анализ соотношения неопределенности Гейзенберга для нижних $^2\Sigma$ электронных состояний молекулы H_2^+	523
СИМАКОВ С.Р., ИВАНОВА Г.Д., ОВСЕЙЧУК О.О. Моделирование многочастотного нелинейного взаимодействия в среде с рельефной нелинейностью.....	525
АСТАШКЕВИЧ С.А., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В. Расчёт вероятности фотоионизации H_2 под действием ультракороткого излучения.....	527

ОГЛУЗДИН В.Е.	
Аксионы в оптических экспериментах.....	529
ТУРОВЦЕВ В.В., ОРЛОВ Ю.Д., КАПЛУНОВ И.А.	
Интенсивности переходов крутильных колебаний.....	531
ЗЕМЛЯНОВ А.А., ТРИФОНОВА А.В., РЯМБОВ Р.В.	
Влияние концентраций агломерированных наночастиц Al и Ag на пороги безрезонаторной генерации.....	533
ТАРАСОВ А.П., БРИСКИНА Ч.М., МАРКУШЕВ В.М., ЗАДОРОЖНАЯ Л.А., ЛАВРИКОВ А.С.	
Лазерные моды в тетраподах ZnO, полученных методом карботермического синтеза.....	535
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В., ЧЕБОТАРЕВ И.А.	
Широкополосная селекция генерации на высоких колебательных переходах СО-лазера с модуляцией добротности резонатора с помощью оптического фильтра.....	537
ВЛАСОВА К.В., МАКАРОВ А.И., АНДРЕЕВ Н.Ф., КОНОВАЛОВ А.Н., КОЖЕВАТОВ И.Е., СИЛИН Д.Е.	
Синтетический кристаллический кварц как материал для выходных каскадов мощных лазерных систем.....	539
БЛИНОВ И.Ю., ВОСКАНОВ М.Л., ХАТЫРЕВ Н.П.	
О проблемах и перспективах создания эталонных лазеров с длиной волны 0,633 мкм с повышенной стабильностью частоты.....	541
ФЕДИН А.В.	
Стабилизация спектра генерации твердотельного импульсного Nd:YAG-лазера с многопетлевым резонатором.....	543
ГАЛУШКИН М.Г. , ГРИШАЕВ Р.В.	
Энергетические параметры двухпроходных планарных усилителей на YAG:Yb ⁺³ с диодной накачкой.....	545
КОЖЕВНИКОВ В.А., ПРИВАЛОВ В.Е.	
Влияние геометрии сечения активного элемента лазера на усиление излучения.....	547
БАЗЗАЛ Х., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П., ЛЫЧКОВСКИЙ В.В.	
Исследование влияния межимпульсного интервала на процессы образования AlN при воздействии на алюминиевую мишень сдвоенными лазерными импульсами.....	549
НГУЕН К.З., ШАХНО Е.А., ЗАКОЛДАЕВ Р.А., СИНЁВ Д.А., ЛЬБОНГ В.К.	
Особенности интерференционной лазерной термохимической записи на тонких плёнках титана при пикосекундном воздействии.....	551
МЕЛЕХОВ А.П., ВОВЧЕНКО Е.Д., КОМАРЕЦКИЙ В.М., РАМАКОТИ Р.Ш.	
Высокоскоростная оптическая регистрация процесса формирования излучающей терагерцовое излучение вакуумной искры.....	553

ГЕТМАНОВ Я.В., ДОРОХОВ В.Л., ЗАРОВСКИЙ А.И., КОМЕЛЬКОВ А.С., КУРКИН Г.Я., ПЕЛИПЕНКО В.И.	
Пикосекундный диссектор со скрещенной разверткой.....	555
НЕУПОКОЕВА А.В., НЕБОГИН С.А.	
Зондовая микроскопия кристаллограмм при лазерной модификации органических растворов.....	557
РОГАЛИН В.Е., КРЫМСКИЙ М.И., КОЛЧИН С.С., АРАНЧИЙ С.М., КАПЛУНОВ И.А.	
СО ₂ лазерный аппарат для купирования хронического болевого синдрома...	559
МАСЛОВА Г.Т., БУЛОЙЧИК Ж.И., ЗАЖОГИН А.П., МАВРИЧЕВ А.С., ДЕРЖАВЕЦ Л.А., ТРУБЕЦКАЯ А.С., ТИТОВА А.В.	
Применение лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии высохших капель плазмы крови в диагностике опухолей мозга.....	561
КРАСНИКОВ И.В., СЕТЕЙКИН А.Ю., КОВТАНЮК А.Е., ТРОФИМОВА О.Н., ПРОХОРОВ И.В., КИМ Ж.Г.	
Моделирование температуры кожного покрова, содержащего наночастицу золота, при воздействии лазерного излучения.....	563
КОВАЛЕНКО А.А., ЯРОСЛАВСКИЙ И.В., СОБОЛЬ Э.Н., АЛЬТШУЛЕР Г.Б., ЕВТИХИЕВ Н.Н.	
Экспериментальное исследование тепловых полей при воздействии лазерного излучения на хрящевую ткань.....	565
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ДОЛГУШКИН Д.А., ВОЛОВА Л.Т., ЛАЗАРЕВ В.А., МАРКОВА М.Д., ТИХОМИРОВА Г.П., ЛОМКИНА А.В.	
Оптическая оценка качества восстановления суставной поверхности коленного сустава кроликов после хондропластики.....	567
БУХАРИНА А.Б., ПЕНТО А.В., АБЛИЗЕН Р.С., СИДОРОВ А.И., КРАВЕЦ К.Ю.	
Ионизация излучением лазерной плазмы в масс-спектрометрическом анализе биологических объектов при атмосферном давлении.....	569
ПАТАПОВИЧ М.П., ЗАЖОГИН А.П., МИНЬКО А.А., ПАВЛЮКОВЕЦ С.А.	
Ретроспективная оценка содержания эссенциальных элементов в волосах матери и ребенка методами атомно-эмиссионной спектрометрии.....	571
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ПИСАРЕВА Е.В., ФЕДОРОВА Я.В., СУБАТОВИЧ А.Н.	
Спектральный анализ эффективности лечения костей крыс после овариоэктомии гидроксипатитом.....	573
СТАРЦЕВА Е.Д., АНДРЕЕВА В.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.	
Исследование тепловых полей почечных камней при дроблении тулиевым волоконным лазером.....	575
ГРИГОРЬЕВ Р.О., КУЗИКОВА А.В., КУРАСОВА А.П., ХОДЗИЦКИЙ М.К., ДЕМЧЕНКО П.С., ЗАХАРЕНКО А.А., ХАМИД А.Х., СЕНЮК А.В.	
Исследование оптических свойств и спектральных характеристик желудка человека в терагерцовом диапазоне частот для интераоперационной диагностики онкологии.....	577

РЫБАСЬ А.Ф., ОНИКИЕНКО Е.В., ВДОВИЧЕНКО А.Н. Анализ состояния тканей щитовидной железы методом стокс-поляриметрии.....	579
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ФРОЛОВ О.О., ТИХОВ И.С., ЯГОФАРОВА Е.Ф. Спектральный анализ биоимплантатов для стоматологии.....	581
КРУПИНА Н.В., ВЕРИНА Е.В., ХНЫКИНА К.А. Исследование спектра КРС глюкозы.....	583
ГАЛИАХМЕТОВА Д.И., ГАЛИМУЛЛИН Д.З., СИБГАТУЛЛИН М.Э. Разделение сложных спектров методом искусственной иммунной системы.....	585
ВАСИЛЬЕВ С.В., ДАУКША А.Ю., ИВАНОВ А.Ю. Программный комплекс для расчета полей плотности электронов пароплазменного облака.....	587
ПЕНТО А.В., МУХАМАТНУРОВА А.Р., КУЗЬМИН И.И. Импульсная лазерная десорбция ионов органических соединений с наноструктурированной поверхности кремния излучением с длиной волны 351 и 263 нм.....	589
ТЕРЕНТЬЕВ Р.В., ШИТИКОВ А.Е., БИЛЕНКО И.А., ГОРОДЕЦКИЙ М.Л. Применение электронагревательного элемента для получения растянутых оптических световодов.....	591
ФЕДОРОВ Д.О., КОРЕНСКИЙ М.Ю., ЛАПШИН К.Э., ГАНИН Д.В., КОРЫСТОВ Д.Ю., ВАРТАПЕТОВ С.К. Система высокоскоростного сканирования оптическим излучением с использованием призмы Довэ.....	593
ДУДОВА Д.С., ГАНИН Д.В., ШАВКУТА Б.С., КУПРИЯНОВА О.С., МИНАЕВ Н.В. Формирование прототипов оптических полимерных элементов с помощью ультракоротких импульсов.....	595
АХМЕТОВ А.Р., ЛЮБИМОВ А.И. Исследование деформации дифракционных решеток под действием наноимпульсного излучения.....	597
АВЕРИН С.В., КУЗНЕЦОВ П.И., ЖИТОВ В.А., ЗАХАРОВ Л.Ю., КОТОВ В.М. Двухцветный фотодетектор видимой части спектра на основе брегговского рефлектора ZnS/ZnSe.....	599
ИВАНОВ В.И., СИМАКОВ С.Р. Механизм фоточувствительности халькогенидных пленок.....	601
ЗАВГОРОДНИЙ А.В., АХАТОВА Ж.Ж. Фотоэлектрические характеристики твердой пленки фталоцианина меди.....	603
ГОРЯЕВ М.А. Сенсибилизация красителями фотоэффекта в монокристаллическом кремнии.....	605

ГОРЯЕВ М.А., СМИРНОВ А.П. Сенсибилизация красителями фотопроцессов в системе диэлектрик – полупроводник.....	607
ТЕМИРБАЕВА Д.А., АФАНАСЬЕВ Д.А., ИБРАЕВ Н.Х. Фотоперенос электрона с красителя на полупроводник TiO ₂	609
ФИЛАТОВ А.Л., ПЕТРОВ О.А., ЕЛИСЕЕВ М.А. Автоматизация монохроматора МДР-23 на базе платформы Нетдуино для фотолюминесцентных исследований полупроводниковых гетероструктур.....	611
ШТАРЕВА А.В., СЮЙ А.В., ШТАРЕВ Д.С., НАЩОЧИН Е.О. Фотокаталитическая активность гетероструктур, состоящих из двух различных висмутатов стронция.....	613
САДЫКОВА А.Е., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В., ИБРАЕВ Н.Х. Исследование фотокаталитических свойств наночастиц TiO ₂	615
ЖУМАБЕКОВ А.Ж., ИБРАЕВ Н.Х., САДЫКОВА А.Е., СЕЛИВЕРСТОВА Е.В. Исследование фотокаталитических свойств нанокompозита TiO ₂ -GO.....	617
РОМАШКО Р.В., ЛО И., ШИХ Ч.-Х., КОЛЧИНСКИЙ В.А. Исследование фотохромных свойств нитрида галлия, допированных железом и медью.....	619
ФИЛАТОВ А.Л. Новая модель расчета нелинейности фоторефракционного эффекта в кремнии обусловленной изменением величин коэффициента амбиполярной диффузии и времени жизни фотовозбужденных носителей при различной интенсивности луча накачки.....	621
РОМАШКО Р.В., ЛЯО Д.-Д., КОЛЧИНСКИЙ В.А. Исследование электрохромных свойств новых функциональных полимеров.....	623
ШЕСТАКОВА А.П., ЛАВРОВ С.Д., ЕФИМЕНКОВ Ю.Р. Высокочувствительный фотодетектор на основе монослоев MoS ₂ : технологический процесс.....	625
СТОЙКОВА Е., НАЗАРОВА Д., ИВАНОВ Б. Мониторинг процессов методом динамического лазерного спекл-анализа....	627
МАКСИМОВА Л.А., МЫСИНА Н.Ю., РЯБУХО П.В., ЛЯКИН Д.В., РЯБУХО В.П. Продольная когерентность и мгновенные спекл-структуры в оптическом волновом поле с широкими частотным и угловым спектрами.....	629
АДАМОВ А.А., БАРАНОВ М.С., ХРАМОВ В.Н. Вариации модифицированного метода лазерной триангуляции.....	631
ИСМАИЛОВ Ш.М., КАМЕНЕВ В.Г. Четырехканальная система регистрации эффекта когерентного обратного рассеяния от дисперсных сред.....	633
ШОСТКА Н.В., КАРАКЧИЕВА О.С., СОКОЛЕНКО Б.В., ШОСТКА В.И. Формирование системы оптических ловушек.....	635

ЕФИМОВА К.В., КИШКИН С.А., КОТОВА С.П., ПРОКОПОВА Д.В. Аппаратно-программный комплекс для расчета и формирования спиральных пучков света.....	637
АБРОСИМОВ И.Н., АНДРУЩАК Е.А., КУЗНЕЦОВ В.В. Волновые процессы совместимые с преобразованиями в активной оптике.....	639
ПЕЧИНСКАЯ О.В. Оценка эффективности применения адаптера Шаймпфлюга в оптических измерительных системах.....	641
БУСУРИН В.И., ЖЕГЛОВ М.А., КОРОБКОВ К.А., БУЛЫЧЕВ Р.П. Разработка метода «грубо-точной» обработки информации в преобразователе ускорений с оптическим считыванием.....	643
ДЕНИСОВ Д.Г., МОРОЗОВ А.Б. Специфика метода определения локальных отклонений нанометрового уровня в заданных пространственно-частотных диапазонах профилей оптических поверхностей.....	645
БАЗЫКИН С.Н., БАЗЫКИНА Н.А., САМОХИНА К.С. Оптико-электронное устройство для измерения линейных перемещений объектов.....	647
ШНЫРЕВ С.Л., КОНДРАШОВ А.А., ДОЛИН А.А., КОЛЕСНИЧЕНКО А.А. Анализ современных методов и средств контроля серосодержащих соединений.....	649
ПОЛЯКОВ А.В., САХОНЧИК Д.Г. Анализ кратковременных флуктуаций периода рециркуляции в замкнутых оптоволоконных системах.....	651
ШАЧНЕВА Е.А., МУРАШКИНА Т.И. Особенности определения конструктивно-технологических параметров механической преобразующей волоконно-оптического датчика параметров жидкости.....	653
КАМЕНЕВ О.Т., ПЕТРОВ Ю.С., КОЛЧИНСКИЙ В.А., ПОДЛЕСНЫХ А.А. Испытание волоконно-оптического деформометра с пассивной стабилизацией в условиях подземного рудника.....	655
ПАРФЕНТЬЕВА В.Б., КАМЫНИН В.А., ТРИКШЕВ А.И. Измерение дисперсионных характеристик оптических волокон с использованием интерферометра Майкельсона.....	657
МОСТОВАЯ Е.И., БЕЛОНЕНКО М.Б. Трехмерные chirпированные световые пули в углеродных нанотрубках.....	659
ИВАНОВ Д.М., РУЖИЦКАЯ Д.Д., РЫЖИКОВ С.Б., РЫЖИКОВА Ю.В. Анализ устойчивости характеристик систем дендритного типа.....	661
АНТОНОВ А.И. Определение коэффициентов фурье-разложения диэлектрической проницаемости тонких слоев пилообразных микроструктур в рамках RCWA-метода.....	663

ШОСТКА В.И., ШОСТКА Н.В. Идентификация фрактально-кластерных структур в приповерхностном слое воды.....	665
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., АНУФРИК С.С., ЛЯЛИКОВ А.М. Применение муарового эффекта для визуализации макродефектов динамических периодических структур.....	667
БОЙЧЕНКО А.П., ШАЙТАНОВ Д.В. Электрополевая визуализация на рентгеновских фотоматериалах с истекшим сроком годности.....	669
ДОНЕНКО И.Л. Модификация прибора ночного видения методами фрактальной оптоэлектроники.....	671
АВЕРОЧКИН Е.П., РЫЖИКОВ С.Б., РЫЖИКОВА Ю.В. Оптические свойства аппроксимантов фракталоподобных многослойных структур с метаматериалами.....	673
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И. Новый полимерный материал для фотостимулированной ориентации ЖК....	675
КУДИНОВ О.Б., БЕЛАШОВ А.В., ПЕТРОВ Н.В., ХУРЧАК А.П. Пространственно-временной модулятор света на основе жидкокристаллического дисплея ELT240320ATP и микроконтроллера Arduino.....	677
ЕЖОВ В.А., КОМПАНЕЦ И.Н. Дистанционный бинокулярный СЖК фильтр для безочкового наблюдения стереоизображений миллисекундной длительности.....	679
МАКСИМОВА Л.А., ДЬЯЧЕНКО А.А., МЫСИНА Н.Ю. Формирование микроскопических интерференционных изображений тонких слоев при большой числовой апертуре поля освещения.....	681
ПЕРЕВОЗНИКОВА А.С., ДУБЫНИН С.Е., БОРОДИН Ю.П., ПУТИЛИН А.Н., МОРОЗОВ А.В., КОПЁНКИН С.С. Измерение фазовой задержки на LCoS, работающего в наклонных пучках, в интерферометре Маха-Цендера.....	683
ИЛЬИНА Н.С., ПОРОЙКОВ А.Ю. Выбор схемы лазерного интерферометра для измерения формы диффузно отражающей поверхности с высоким динамическим диапазоном.....	685
ГРИЗБИЛ Б.А., САХАДЖИ Г.В., ЖУРАВЛЕВ С.Д., БОГАЧЕВ Р.Ю., РЯБУХО В.П. Лазерная спекл-интерферометрия относительных температурных смещений рассеивающих объектов.....	687
ЛУКАХИН П.О., ПАВЛОВ И.Н., РАСКОВСКАЯ И.Л. Применение лазерного рефракционного метода для измерения краевого угла смачивания капли, лежащей на непрозрачной подложке.....	689
ЗАХАРОВ С.М. Фотоплетизмограммы и измерение артериального давления в режиме реального времени.....	691

ЗАХАРОВ С.М.	
Вариабельность артериального давления на малых временных интервалах...	693
ИСМАНОВ Ю.Х., ТЫНЬШОВА Т.Д.	
Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм.....	695
ИЗОТОВА О.А., РЯБУХО В.П.	
Интерференционный микроскоп с пространственной фильтрацией поля изображения в частично-когерентном свете.....	697
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛЯЕВА Т.Н., КОРНИЛОВА Е.С., САЛОВА А.В., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.	
Исследование процессов разрыва мембраны живых клеток при различных параметрах фотодинамического воздействия с помощью цифровой голографической микроскопии.....	699
ЛЬВОВА К.И., ПЕРЕВОЗНИКОВА А.С., ПУТИЛИН А.Н., МОРОЗОВ А.В., МАЛИНОВСКАЯ Е.Г.	
Оптическая система устройства слежения за направлением взгляда на основе волновода и дисперсионных свойств дифракционного оптического элемента.....	701
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х.	
О влиянии градиента температуры фототермопластической пленки на процесс проявления голограмм.....	703
ВОРЗОБОВА Н.Д., СОКОЛОВ П.П.	
Формирование трехмерных объектов методом голографической 3D печати.....	705
ПЕН Е.Ф.	
Голографические решётки в качестве пассивных трекеров солнечного излучения.....	707
ПЕРЕВОЗНИКОВА А.С., ЛЬВОВА К.И., КОПЁНКИН С.С., ДРУЖИН В.В.	
Расчёт светосильных объективов и их применение для записи внеосевых голографических элементов.....	709
АНУФРИК С.С., БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Минимизация аберраций, вносимых системой записи и подложкой носителя голограммы, при формировании голографических интерферограмм сдвига.....	711
ХУРЧАК А.П., ЛАТУШКИН А.А., БЕЛАШОВ А.В., ПЕТРОВ Н.В.	
Осевая цифровая голография для исследования микрообращения оптических материалов в водной среде.....	713
АРАПОВ Ю.Д., КАМЕНЕВ В.Г., ДВОРНИЧЕНКО М.Е.	
Исследование послыонного восстановления пылевого объема голографическим методом.....	715
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Голографическая интерферометрия реального времени динамических периодических структур.....	717

ГОЛЕНКО Г.Г.	
Физика и метафизика зрения.....	719
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С., ТРОЦЕНКО Н.А.,	
ФАЗЛИЕВ Т.Ш.	
Синтез корреляционного фильтра МСЭК для распознавания	
субпиксельных изображений.....	721
ГОНЧАРОВ Д.С., ПЕТРОВА Е.К., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С.	
Особенности применения цветовых моделей при распознавании цветных	
изображений с использованием инвариантных корреляционных фильтров...	723
ГОНЧАРОВ Д.С., ПОНОМАРЕВ Н.М., СТАРИКОВ Р.С., ТРОЦЕНКО Н.А.,	
ФАЗЛИЕВ Т.Ш.	
Исследование методов синтеза корреляционных фильтров,	
инвариантных к освещенности сцены.....	725
КУРБАТОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Анализ блоковой структуры локальных методов бинаризации	
при сжатии цифровых голограмм.....	727
РЫМОВ Д.А., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Неитеративный нелинейный метод фильтрации порядков дифракции	
в цифровой голографии.....	729
КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Восстановление изображений из однопиксельных регистраций	
в цифровой голографии.....	731
КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В., ЭРЬКИН И.Ю.	
Подавление спекл-шума за счет динамического отображения набора	
киноформов, содержащих разреженные изображения.....	733
КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Анализ потенциала оптимизации сенсоров цифровых камер путём	
варьирования характеристик пикселя.....	735
КРАСНОВ В.В., РЯБЦЕВ И.П.	
Безлинзовая схема оптического кодирования изображений	
с пространственно-некогерентным освещением.....	737
КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В.	
Асимметричное оптическое кодирование изображений с использованием	
пространственно-некогерентного освещения.....	739
МОЛОДЦОВ Д.Ю., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.	
Применение микрзеркальных модуляторов для оптического	
кодирования изображений в пространственно-некогерентном свете.....	741
Именной указатель авторов.....	743

Ж.-К. КАСТЕЛИК

Политехнический университет О-де-Франс, Валансьен, Франция

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДЛИН ВОЛН ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В работе представлены принцип действия и характеристика по оптическим длинам волн перестраиваемого акустооптического интерферометра (ПАОИ). Широкоапертурный акустооптический фильтр изображений помещается в выходное плечо интерферометра. Основная особенность – то, что изображение, проходящее через акустооптическую ячейку, дифрагирует без нарушения интерференционной картины. Работа ПАОИ была протестирована в спектральном диапазоне 450-800 нм и для различных источников оптического излучения.

Jean-Claude KASTELIK

Polytechnic University of Hauts-de-France, Valenciennes, France

WAVELENGTH CHARACTERIZATION OF A TUNABLE ACOUSTO-OPTIC INTERFEROMETER

This paper presents the operating principle and the optical wavelength characterization of a tunable acousto-optic interferometer (TAOI). A large optical aperture acousto-optic imager is placed at the output arm of an interferometer. The main feature is that the interferometric image passing through the acousto-optic cell is diffracted without destruction of the interference pattern. The TAOI has been tested over a large 450-800 nm band and with different types of optical sources.

Использование акустооптических устройств в интерферометрах является распространенным приемом в оптической метрологии. Он основан на использовании одной или двух акустооптических ячеек, помещенных во входных плечах оптического интерферометра. Например, такая комбинация акустооптических модуляторов используется для оптического сдвига фаз [1], также как акустооптические дефлекторы для отображения интерференционных картин [2]. Недавно была представлена [3] конфигурация с использованием акустооптического перестраиваемого фильтра на выводе интерферометра для комбинированной широкополосной, спектральной и когерентной микроскопии.

В этой работе представлена экспериментальная установка на основе интерферометра Майкельсона (Thorlabs EDU-MINT1) и акустооптического перестраиваемого фильтра для спектрального анализа изображений (Gooch Housego, диоксид теллура TF625-350-2-11-BR1A).

Устройство работает в широком диапазоне длин волн (450 - 800 нм) с большой оптической апертурой ($> 1\text{см}^2$). Взаимодействие основано на классической конфигурации не критического фазового синхронизма (НФС) с падающим поляризованным пучком. Однако мы используем устройство близко к конфигурации НФС [4, 5], что обеспечивает одновременную дифракцию двух оптических мод, распространяющихся в кристалле за счет единственной ультразвуковой волны.

Экспериментальная установка была протестирована на различных оптических источниках: линейно-поляризованный твердотельный лазер с длиной волны 671 нм, линейный поляризованный гелий-неоновый лазер 633 нм, эллиптически-поляризованный коллимированный лазерный диодный модуль 532 нм, широкополосный источник света видимого и ближнего ИК диапазона (Thorlabs SLS201L). Ультразвуковые рабочие частоты находятся в диапазоне 70 - 135 МГц. На рис. 1 показан вид экспериментальной установки. На рис. 2 и 3 приведены картины дифрагированных изображений интерференции.

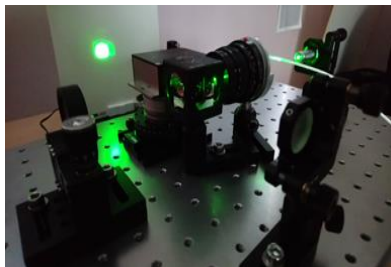


Рис. 1. Вид экспериментальной установки



Рис. 2. Дифрагированная интерференционная картина $\lambda=633\text{ нм}$

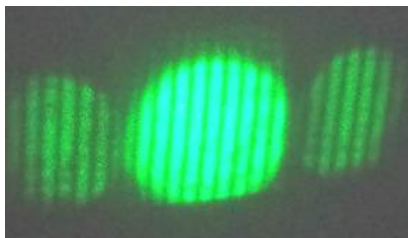


Рис. 3. Прошедшая и ортогонально поляризованная дифрагированные интерференционные картины $\lambda=532\text{ нм}$

Следует отметить, что экспериментальная установка проста в построении и может использоваться в образовательных целях.

Список литературы

1. Li E., Yao J., et. al. // Optics Letters. 2005. V. 30. P. 189-191.
2. Dupont S., Kastelik J.-C. // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78(10). P. 105102.
3. Machikhin A.S., Pozhar V.E., et. al. // Applied Optics. 2015. V. 54 (25). P. 7508-7513.
4. Champagne J., Kastelik J.-C., et. al // Applied Optics. 2018. V. 57 (10). P. 49-55.
5. Kastelik J.-C., Yushkov K.B., et. al. // Optics Express. 2009. V. 17(15). P. 12767-12776.

Б.Б.Ю. ЛИНДЕ

Гданьский университет, Польша

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИМИ И ФОТОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В работе представлены исследования циклических соединений, а также смеси воды с неэлектролитами ультразвуковыми и фотоакустическими методами. Исследования показали существование релаксационных процессов в исследуемых жидкостях и в водных смесях образования интересных структур.

BOGUMIŁ B.J. LINDE

University of Gdansk, Poland

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LIQUID BY ACOUSTIC AND PHOTOACOUSTIC METHODS

The paper presents research of cyclic compounds, as well as a mixture of water with nonelectrolytes by ultrasonic and photoacoustic methods. Research has shown the existence of relaxation processes in the studied liquids and in aqueous mixtures accompanied by formation of interesting structures.

Представленная работа разделена на три части:

1) исследование релаксации типа Кнесера, то есть передача энергии между трансляционными и колебательными степенями свободы; 2) так называемая изомерная релаксация, вызванная изомерической трансформацией соединений; 3) процессы создания комплексных соединений так называемого “гостя-хозяина” между водой и растворенным неэлектролитом. Все эти исследования проводились фотоакустическими и ультразвуковыми методами. Следует отметить, что это впервые проведено в очень широком диапазоне частот.

Акустические молекулярные процессы происходят как взаимодействие упругой волны, проходящей через среду с ее частицами. Это взаимодействие заключается в обмене энергией между волной и колебательными степенями свободы частиц (термическая релаксация типа Кнесера). Акустическая спектроскопия в диапазоне частот от 0,3 до 3 ГГц дает возможность исследовать жидкие вещества, где существует акустическая абсорбция, более высокая, чем классическая, вызванная колебательной релаксацией (рис. 1). На основе серии исследований двух соединений показана возможность некорректной оценки активных

степеней свободы в наблюдаемом процессе акустической релаксации, в основном в случае ограниченного диапазона частот [1-4].

В процесс термической релаксации, наряду с вышеупомянутым обменом энергией между акустической волной и колебательными степенями свободы также происходит другой процесс – обмен энергии между транслирующими модами (ультразвуковая волна) и двумя изомерическими состояниями. Этот тип релаксации происходит в присутствии смеси вращательных изомеров в жидкостях. Молекула может находиться в определенном изомерном состоянии или быть преобразована в другую путем проведения соответствующей вращательной перестройки атомов. Это соответствует конкретным энергетическим состояниям равновесия [5]. Изучение водных растворов органических жидкостей, проведенных в последнее время с использованием как фотоакустических, так и ультразвуковых методов, показало возможность более широкой интерпретации явлений появления клатратных структур (квазистабильных ассоциатов) и релаксационных процессов, происходящих в растворах вода-гликоль. Представлено обсуждение полученных результатов для упомянутых выше явлений. Это позволило нам провести сравнение и общую интерпретацию экспериментальных результатов (рис. 2) [6-11].

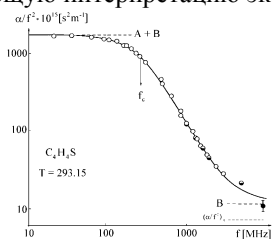


Рис. 1. Кривая, показывающая акустическую релаксацию в тиофене при 293,15 К

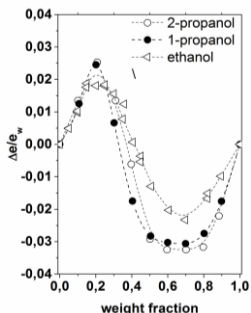


Рис. 2. Отклонение эффузии от линейности, определяемое фотоакустическими измерениями для смесей других простых спиртов с водой

Список литературы

1. Linde B., Lezhnev N.B. // Ultrasonics. 2000. V. 38. P. 945-951.
2. Linde B., Lezhnev N.B. // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. 1467-1470.
3. Linde B., Skrodzka E., Lezhnev N.B. // Int. J. Thermophys. 2012. V. 33. № 4. P. 664-667.
4. Linde B., Skrodzka E. // Acta Phys. Polonica. 2015. V. 127. P. 120-124.
5. Linde B. // Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego (Publisher University of Gdańsk), 1997.
6. Sikorska A., Linde B., Kukielski J.I. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2001. V. 3. P. 71-76.
7. Sikorska A., Linde B., Żwirbla W. // Chem. Phys. 2005. V. 320. P. 31-36.
8. Sikorska A., Dadarlat D., Linde B., et. al. // Journal de Physique IV. 2006. V. 137. P. 341-346.
9. Sikorska A., Linde B. // Chem.Phys. 2008. V. 354. P. 148-154.
10. Sikorska A., Ponikwicki N., et. al. // Int. J. Thermophys. 2010. V. 31. № 1. P. 131-142.
11. Ponikwicki N., Szczepanik L., et. al. // Archives of Acoustics, 2018.

С.М. ПОПОВ, О.В. БУТОВ, А.О. КОЛОСОВСКИЙ, В.А. ИСАЕВ,
В.В. ВОЛОШИН, И.Л. ВОРОБЬЁВ, М.Ю. ВЯТКИН,
А.А. ФОТИАДИ¹, Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

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

¹Ульяновский государственный университет

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С МАССИВАМИ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОНИКИ

В работе представлены экспериментальные результаты по потоковой записи волоконных брэгговских решёток (ВБР) за один импульс во время процесса вытяжки оптического волокна (ОВ). Контраст записи (превышением величины обратного сигнала над уровнем Рэлея) достигает величины 50 дБ на $\lambda=1550$ нм с использованием фоточувствительной заготовки. Ширина спектра отражения достигает 4 нм с использованием chirpированной фазовой маски. В докладе также будут рассмотрены примеры практического применения таких ОВ.

S.M. POPOV, O.V. BUTOV, A.O. KOLOSOVSKIY, V.A. ISAEV,
V.V. VOLOSHIN, I.L. VOROB'EV, M.Yu. VYATKIN,
A.A. FOTIADI¹, Yu.K. CHAMOROVSKIY

*Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS
¹Ulyanovsk State University*

OPTICAL FIBER WITH ARRAYS OF FBGS FOR PHOTONICS APPLICATIONS

The paper presents the experimental results of fiber Bragg gratings (FBG) streaming inscription per single pulse during optical fiber (OF) drawing process. The inscription contrast using a photosensitive preform is up to 50 dB (the excess of the reverse signal above the Rayleigh level) at $\lambda = 1550$ nm. The width of the reflection spectrum is up to 4 nm using a chirped phase mask. Examples of the practical usage such OFs will be considered during the talk.

Оптические волокна (ОВ) в данное время используются, как для линий передачи информации, так и в сенсорных системах. В последнем случае для создания распределённых сенсорных систем требуются ОВ, которые должны отдавать обратный сигнал, значительно превышающий уровень обратного рассеяния Рэлея. Нами разработано ОВ с ВБР запись которого производится во время процесса вытяжки ОВ [1-3]. Формирование

массива ВБР в таком ОВ выполняется с помощью УФ-лазера через фазовую маску. Количество ВБР на 100 метрах такого ОВ может достигать 10000 штук. Увеличение обратного сигнала по сравнению с уровнем рассеяния Рэля достигает 50 дБ на $\lambda=1550$ нм. Используя данные ОВ созданы «случайные» узкополосные ВРМБ лазеры с коротким резонатором [4]. Перестройка по длине волны таких лазеров возможна с помощью записи ВБР в тейперных ОВ [5]. Типичная ширина спектра отражения массива ВБР составляет величину 0.3 нм. Используя chirpированную фазовую маску, ширина спектра отражения массива достигает величины 4 нм. Запись массива ВБР возможна как в ОВ вытягиваемом из фоточувствительной заготовки (сердцевина $\text{GeO}_2\text{-B-SiO}_2$), так и в обычном одномодовом телекоммуникационном ОВ типа SMF-28 (рис. 1). В последнем случае контраст записи достигает величины 25 дБ на $\lambda=1550$ нм, что значительно превышает уровень рассеяния Рэля и расширяет возможности применения такого ОВ в системах когерентной рефлектометрии [6]. Кроме того, сделана запись массивов ВБР в многосердцевинных ОВ и ОВ легированных эрбием (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-60109 мол_а_дк.

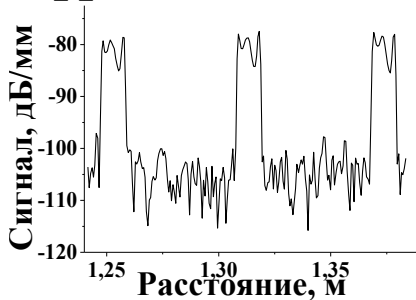


Рис. 1. Частотная рефлектограмма ОВ типа SMF-28 с массивом ВБР записанным при его вытяжке с шагом 6 см

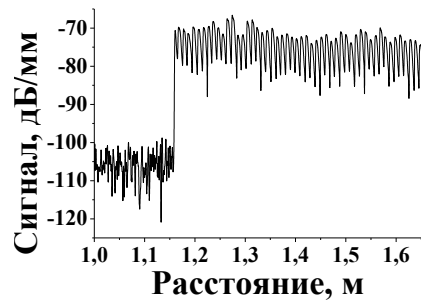


Рис. 2. Частотная рефлектограмма ОВ легированного эрбием (6 дБ/м@975 нм) с массивом ВБР записанным при его вытяжке и 100% заполнением

Список литературы

1. Зайцев И.А., Бутов О.В. и др. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61 (6). С. 602.
2. Chamarovskiy Yu.K., Butov O.V., et. al. // Opt. Fiber Tech. 2017. V. 34. P. 30.
3. Popov S.M., Butov O.V., et. al. // Proc. of PIERS Spring 2017. 2017. P. 1568.
4. Popov S.M., Butov O.V., et. al. // Results in Physics. 2018. V. 9. P. 806..
5. Popov S.M., Butov O. V., et. al. // Results in Physics. 2018. V. 9. P. 625.
6. Кузьменков А.И., Вяткин М.Ю. и др. // Фотон-Экспресс. 2016. Т. 134 (6). С. 16.

В.А. ДЕДИУ, И. БЕРЖЕНТИ

Институт наноструктурных материалов Национального исследовательского совета Италии, Болонья

СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Приведено определение правил для работы органических светоизлучающих диодов (ОСИД) со спин-поляризованными токами. Показано, что эффективность излучения света может быть увеличена со стандартных 25 % до 50 % в ОСИД с синглетным излучением и с 75 % до 100 % в случаях с триплетным излучением. Мы также обсуждаем правильную ориентацию спиновых поляризаций инжектирующих электродов для усиления выбранной, синглетной или триплетной, экситонной населенности.

V.A. DEDIU, I. BERGENTI

Institute of Nanostructured Materials of the National Research Council, Bologna, Italy

SPIN POLARISED ELECTRODES FOR ORGANIC LIGHT EMITTING DIODES

The paper presents the definition of rules for the operation of Organic Light Emitting Diodes (OLED) with spin polarized currents. It is shown that the efficiency of light emission can be increased from the standard 25 % to 50 % in singlet emitting OLEDs and from 75 % to 100 % in triplet emitting cases. We also discuss the correct orientation of the spin polarisations of the injecting electrodes for enhancing the selected, singlet or triplet, exciton population.

Спиновая статистика рекомбинации носителей в органических полупроводниках привлекает внимание как фундаментальными, так и прикладными аспектами. Электролюминесценция в органических светоизлучающих диодах (ОСИД) в основном основана на радиационном распаде синглетных экситонов [1], которые создаются путем инжекции электронов (e) и дырок (h) из отдельных электродов. Синглет/триплетное соотношение определяется квантовой статистикой как 1:3 с учетом аналогичной вероятности образования для одного синглетного и трех триплетных состояний. Использование спин-поляризованной (СП) инжекции в ОСИД должно в принципе помочь преодолеть статистические ограничения 1:3. Была получена значительная СП-инжекция из ферромагнитных материалов в p -конъюгированные олигомеры [2, 3].

Рассмотрим влияние СП-инжекции на формирование экситона. При инжекции без СП (присутствуют все носители $e\uparrow$, $e\downarrow$, $h\uparrow$ и $h\downarrow$), два

электрона и две дырки могут вообще объединяться в четыре разные пары: $e\uparrow h\uparrow$, $e\uparrow h\downarrow$, $e\downarrow h\uparrow$ и $e\downarrow h\downarrow$. В первом приближении параллельные состояния не вносят вклад в излучение света, а антипараллельные - способствуют с некоторой конечной вероятностью. В синглет-триплетном режиме любая антипараллельная пара соответствует $1/2 (S + T)$, а четыре пары дают одно синглетное и три триплетных состояния, что приводит к известной $1/4$ вероятности образования синглета:

$$e\uparrow h\uparrow + e\uparrow h\downarrow + e\downarrow h\uparrow + e\downarrow h\downarrow = T + 1/2 (S + T) + 1/2 (S + T) + T = S + 3T. \quad (1)$$

В случае одного спин-поляризованного электрода (присутствуют только носители $e\uparrow$, и $h\uparrow$, $h\downarrow$):

$$e\uparrow h\uparrow + e\uparrow h\downarrow = T + 1/2 (S + T) = 1/2 S + 3/2 T. \quad (2)$$

Сумма (2) обеспечивает одинаковое соотношение синглет/триплет, что указывает на отсутствие спин-поляризованных эффектов для только одного СП-электрода. Если оба электрода со спиновой поляризацией ориентированы антипараллельным образом, мы можем рассматривать случай $e\uparrow$, $h\downarrow$ как наиболее благоприятный для образования синглета:

$$e\uparrow h\downarrow = 1/2 (S + T) = 1/2 S + 1/2 T. \quad (3)$$

При такой инжекции должна существовать возможность удвоить эффективность по сравнению с обычными синглетными ОСИД. Для параллельной ориентации, $e\uparrow h\uparrow$ или $e\downarrow h\downarrow$ будут генерировать только триплетные состояния. Поэтому, помимо повышения эффективности, управление спиновой статистикой должно давать возможность переключения с синглетного на триплетный режим работы [4].

Биполярная инжекция спин-поляризованных электронов и дырок требует взаимной магнитной ориентации электродов, что может показаться нелогичным. Параллельная ориентация электродов способствует инжекции электронов со спином вверх в LUMO состояния и извлечению электронов со спином вверх из HOMO состояний, причем последнее фактически означает инжекцию дырок со спином вниз. Таким образом, параллельная ориентация магнитных электродов идеально (100 % СП) обеспечивает светоизлучающую зону комбинацией $e\uparrow h\downarrow$, которая поддерживает статистику экситонов $1/2S + 1/2T$. Точно так же антипараллельная магнитная ориентация электродов обеспечивает комбинацию $e\uparrow h\uparrow$, обеспечивающую только триплетные экситоны.

Список литературы

1. Friend R., Gymer R.W., Holmes A.B., et. al. // Nature. 1999. V. 397. P. 121.
2. Xiong Z.H., Wu D., Vardeny Z.V., Shi J. // Nature. 2004. V. 427. P. 821.
3. Dediu V.A., et. al. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 115203.
4. Dediu V.A., Hueso L.E., Bergenti I., Taliani C. // Nature Materials. 2009. V. 8. P. 707.

К.Б. ЮШКОВ, Ж. ШАМПАНЬ¹, В.Я. МОЛЧАНОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

¹Политехнический университет О-де-Франс, Валансьен, Франция

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ АКУСТООПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Представлен новый тип гиперспектральной системы на основе акустooптического перестраиваемого фильтра (АОПФ), способной регистрировать фазовые объекты. Визуализация фазы осуществляется благодаря дополнительной жидкокристаллической амплитудной маске, форма которой согласована с двумерной передаточной функцией АОПФ, осуществляющей пространственную фильтрацию. Визуализация неокрашенных фазовых объектов продемонстрирована на цитологических мазках с некогерентным диакопическим освещением.

K.B. YUSHKOV, J. CHAMPAGNE¹, V.Ya. MOLCHANOV

National University of Science and Technology MISIS, Moscow

¹Polytechnic University of Hauts-de-France, Valenciennes, France

PHASE OBJECT VISUALIZATION WITH A HYPERSPECTRAL ACOUSTO-OPTICAL METHOD

We report a novel concept of an advanced hyperspectral imaging system based on acousto-optical tunable filters (AOTFs) with optional phase imaging modality. Visualization of phase objects is performed using an additional adjustable liquid crystal amplitude mask. The mask shape is matched with the two-dimensional transfer function of the AOTF enabling bandpass spatial filtering. Label-free phase object visualization is demonstrated with unstained cytological smears using diascopeic incoherent illumination of a standard inverted light microscope.

Акустooптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) широко применяются для гиперспектрального анализа изображений, в том числе в задачах биофотоники [1, 2]. Двумерная передаточная функция АОПФ имеет симметричную форму [3], что позволяет реализовать пространственную фильтрацию световых пучков [4-6]. В настоящей работе создана экспериментальная установка, позволяющая визуализировать на этом принципе прозрачные фазовые объекты.

Установка состоит из инвертированного микроскопа (Ti-E, Nikon Instruments) и оригинальной гиперспектральной системы на основе АОПФ. Схема установки приведена на рис. 1.

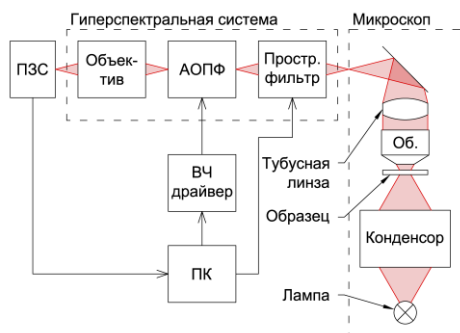


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

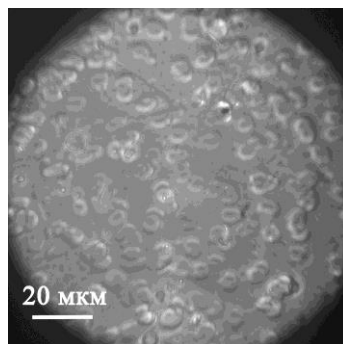


Рис. 2. Фазовая визуализация эритроцитов человека

Прозрачный объект (неокрашенный микропрепарат) освещается некогерентным излучением по диакопической схеме. Светосильный микрообъектив (Plan Apo λ 40 \times /0,95) формирует увеличенное изображение на входе гиперспектральной системы, построенной по конфокальной оптической схеме [1, 6]. В передней фокальной плоскости первой линзы переноса изображения расположен амплитудный пространственный модулятор на жидких кристаллах (L3C07U-85G13, Epson), благодаря чему осуществляется пространственная фильтрация изображения. АОПФ осуществляет спектральную фильтрацию фазового изображения, обеспечивая узкополосность регистрируемого ПЗС-камерой (Alta U32, Argee Instruments) изображения, интенсивность которого равняется квадрату модуля свертки функции фазовой модуляции с Фурье-образом функции амплитудной модуляции.

Результаты обработки изображений предложенным методом приведены на рис. 2. В качестве тестового объекта были использованы неокрашенные микропрепараты цитологических мазков, взятых при биопсии, содержащие эритроциты человека на предметном стекле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-07-00674).

Список литературы

1. Voloshinov V.B., Yushkov K.B., Linde B.B.J. // J. Opt. A. 2007. V. 9 (4). P. 341.
2. Lu G., Fei B. // J. Biomed. Opt. 2014. V. 19 (1). P. 010901.
3. Балакий В.И. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29 (8). С. 1610-1616.
4. Yushkov K.B., et al. // Proc. SPIE. 2018. V. 10744. P. 107440Q.
5. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya., et al. // J. Biomed. Opt. 2016. V. 21 (1). P. 016003.
6. Yushkov K.B., Molchanov V.Ya. // J. Biomed. Opt. 2017. V. 22 (6). P. 066017.

С.В. БОРИТКО, А.В. КАРАНДИН

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ ПРИ РЕЗКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ФАЗЫ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В работе приведены результаты исследования возможности использования акустооптической дифракции в акустооптической ячейке с резким периодическим переключением фазоуправляющего напряжения для регистрации не только спектра оптического излучения, но и его производных. Основное достоинство предлагаемой методики связано с тем, что непосредственная регистрация дифференциальных спектральных характеристик позволяет работать в реальном масштабе времени, что резко сокращает время обработки спектральной информации по сравнению с альтернативными методами, предполагающими измерение протяженного участка спектра, сглаживание и последующее вычисление производных спектра.

S. V. BORITKO, A. V. KARANDIN

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

THE USE OF ACOUSTOPTIC DIFFRACTION DURING THE SHARP PERIODIC CONTROL VOLTAGE PHASES SWITCHING FOR DIFFERENTIAL SPECTROSCOPY

Paper presents the results of studying the possibility of using acousto-optic diffraction in an acousto-optic cell with sharp periodic control voltage phase switching for recording not only the optical radiation spectrum, but also its derivatives. The technique main advantage is the fact that direct differential spectral characteristics registration allows working in real time. This significantly reduces spectral information processing time in comparison with alternative methods involving extended spectrum part measurements, smoothing and subsequent spectrum derivatives calculation.

Одним из способов выявления тонкой структуры оптических спектров является метод дифференциальной спектроскопии. Этот способ широко используется в молекулярной спектроскопии и аналитической химии при исследовании мутных жидкостей и сложных растворов [1, 2]. Процедура заключается в измерении частотной зависимости спектральной плотности образца, затем сглаживание (удаление шумовой составляющей) и

последующее дифференцирование результата. Однако, на современном этапе возникает все больше задач, которые требуют получения результата в процессе исследования, чтобы иметь возможность влиять на его ход. Математика этого не позволяет, для сглаживания надо иметь всю характеристику. В работах [3, 4] теоретически была показана возможность непосредственной регистрации спектра оптического излучения и его производных в процессе проведения измерений. В основе этой возможности лежит акустооптическая (АО) дифракция на фазовой решетке, созданной акустической волной с резким периодическим переключением фазы. Данная возможность была подтверждена экспериментально [5].

Осталось выяснить насколько "физическая" производная, т.е. производная зафиксированная дифференциальным АО спектрометром, совпадает с математической, рассчитанной из частотной зависимости спектральной плотности. Были выбраны два пика излучения неоновой лампы, зарегистрированы их спектры и производные дифференциальным АО спектрометром. Спектры были сглажены математически, а затем продифференцированы. Результаты "физического" и математического дифференцирования приведены на рис. 1. Видно, что различия, а именно, заужение "физической" производной и появление дополнительных экстремумов, связаны с аппаратной функцией АО монохроматора. Однако, на вершинах спектральных пиков, т.е. в районах пересечения

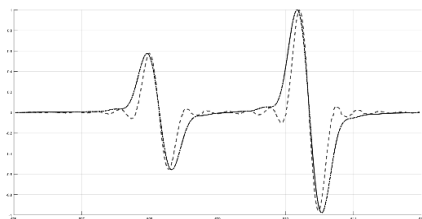


Рис. 1. Вид сглаженных спектров

производных нулевой линии результаты совпадают, что позволяет использовать АО дифференцирование для выявления тонкой структуры оптических спектров.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-07-00089 А.

Список литературы

1. Сааков В., Драпкин В., Кривченко А. и др. Производная спектрофотометрия и спектроскопия ЭПР при решении эколого-биологических проблем. М.: Технолит, 2010.
2. Цокова Т.Н., Котлова Л.И., Осипова А.В. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11-5. С. 694-698.
3. Пустовойт В.И., Пожар В.Э. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. В. 1. С. 121-127.
4. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. В. 9. С. 47-61.
5. Боритко С.В., Пожар В.Э., Карандин А.В. Возможность непосредственной регистрации производных оптического спектра методами акустооптической спектрометрии // Сб. тр. VII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 87-88.

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

ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ МНОГОЦВЕТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

Исследована импульсная модуляция многоцветного излучения на примере использования трех акустооптических (АО) ячеек, изготовленных из TeO_2 , SiO_2 и LiNbO_3 . Показано, что с точки зрения потребляемой электрической мощности несомненным преимуществом обладает АО-ячейка из TeO_2 благодаря, прежде всего, высокому коэффициенту АО-качества, а с точки зрения преобразования электрических импульсов в оптические сигналы с наименьшими искажениями предпочтение отдано ячейкам из SiO_2 и LiNbO_3 .

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

PULSE MODULATION OF MULTI COLOR RADITION BY MEANS OF ACOUSTO-OPTIC BRAGG DIFFRACTION

It is investigated a pulse modulation of the multicolor radiation on the basis of three acousto-optic (AO) cells made from TeO_2 , SiO_2 and LiNbO_3 . It is shown that from the point of view of the electric power consumption the undoubted advantage has the AO cell from TeO_2 first of all due to the high AO figure of merit. From the point of view of the transformation the electrical pulses into optical signals with smallest distortion the preference should be given to the AO cells from SiO_2 and LiNbO_3 .

Акустооптическая (АО) дифракция широко используется для импульсной модуляции оптического излучения. Однако высокая селективность брэгговского режима к длине волны света является существенным препятствием для управления многочастотным лазерным излучением посредством АО-дифракции на одной звуковой волне. В [1-3] было показано, что на основе дифракции в анизотропных средах, допускающей брэгговское взаимодействие одновременно двух оптических лучей с произвольными длинами волн и одной акустической волной, можно получить эффективную дифракцию и многоцветного излучения. В настоящей работе исследована импульсная модуляция

многоцветного излучения Ar-лазера на примере трех АО-материалов - TeO_2 , SiO_2 и LiNbO_3 .

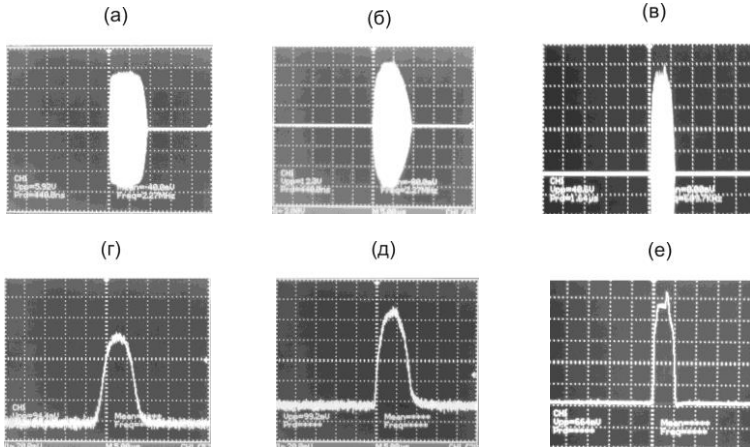


Рис. 1. Фотографии электрических сигналов, подаваемых на ячейку из TeO_2 (а), SiO_2 (б), LiNbO_3 (в), и оптические сигналы, формируемые этими ячейками (г, д, е, соответственно), наблюдаемые на экране осциллографа.

На рис. 1 приведена фотография с экрана осциллографа, где показаны электрические и оптические сигналы. Выявлено, что с точки зрения потребляемой электрической мощности несомненным преимуществом обладает АО-ячейка из TeO_2 благодаря высокому коэффициенту АО-качества, а с точки зрения преобразования электрических импульсов в оптические сигналы с наименьшими искажениями предпочтение отдано ячейкам из SiO_2 и LiNbO_3 .

Список литературы

1. Котов В.М. Модуляция многоцветного излучения Ar-лазера на основе акустооптической дифракции в кристалле парателлурита // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 69-71.
2. Котов В.М., Аверин С.В., Воронко А.И., Кузнецов П.И., Тихомиров С.А., Шкердин Г.Н., Булюк А.Н. Акустооптическая дифракция многоцветного излучения Ar лазера в кристаллическом кварце // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. Вып. 10. С. 942-946.
3. Котов В.М. Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. М.: Янус-К, 2016.

М.И. КУПРЕЙЧИК, В.И. БАЛАКШИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ АКУСТООПТИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С НИЗКОЙ УГЛОВОЙ И ЧАСТОТНОЙ
СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ ДИФРАКЦИИ В ПЕРИОДИЧЕСКИ
НЕОДНОРОДНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ
В ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

В работе проведено исследование характеристик анизотропной дифракции в двuosных кристаллах в периодически неоднородном акустическом поле при небольшом отходе от одной из оптических осей двuosного кристалла. Показано, что в таком случае угловой и частотный диапазоны АО ячейки могут быть существенно расширены в сравнении с вариантом взаимодействия в однородном акустическом поле вблизи одной из оптических осей кристалла.

M.I. KUPREICHIK, V.I. BALAKSHY

Lomonosov Moscow State University

**REGIONS OF ACOUSTO-OPTIC INTERACTION WITH LOW
ANGULAR AND FREQUENCY SELECTIVITY HAVE BEEN
INVESTIGATED FOR THE CASE OF THE DIFFRACTION
IN PERIODICALLY INHOMOGENEOUS ACOUSTIC FIELD
IN BIAxIAL CRYSTALS**

Characteristics of anisotropic diffraction in biaxial crystals have been examined for the case of interaction in a periodically inhomogeneous acoustic field with a slight deviation from one of the optical axes of biaxial crystal. It is shown, that angular and frequency ranges of the AO cell, in this case, can be significantly expanded in comparison with the interaction in a homogeneous acoustic field, when directions of incident and diffracted light beams are close to the optical axis.

Высокая частотная селективность анизотропного акустооптического (АО) взаимодействия в области тангенциальной геометрии является, в большинстве случаев, негативным фактором, ограничивающим диапазон применения АО-устройств. В одноосных кристаллах, при дифракции в однородном акустическом поле, области с одновременно низкой частотной и угловой селективностью реализуются лишь в случае предельно малых углов среза, когда падающий и дифрагированный световые пучки распространяются практически вдоль оптической оси. При этом частота

синхронизма оказывается довольно низкой, а угловой диапазон АО ячейки является недопустимо узким для АО фильтра, вследствие чего рассматриваемый вариант взаимодействия не находит практического применения [1, 2].

Анизотропная дифракция в оптически активных двуосных кристаллах, благодаря сложному виду волновых поверхностей вблизи оптических осей, позволяет реализовать области с одновременно чрезвычайно низкой частотной и угловой селективностью в случае, когда волновой вектор ультразвука практически ортогонален к одной из оптических осей кристалла [3, 4]. При этом поляризация падающего и дифрагированного световых пучков оказывается эллиптической, существенно меняющейся в пределах углового и частотного диапазона АО ячейки, что приводит к ухудшению характеристик дифракции [5].

Для расширения углового и частотного диапазона АО ячейки в настоящей работе предлагается использование в качестве источника ультразвука секционированного преобразователя с антифазным возбуждением соседних секций. Использование секционированного преобразователя приводит к расщеплению брэгговской кривой на две ветви оптимальных углов, причем величина расщепления определяется как периодом структуры, так и конфигурацией среза кристалла.

Грамотный выбор ветви оптимальных углов падения, периода структуры и среза двуосного кристалла позволяет получить область с чрезвычайно низкой частотной и угловой селективностью дифракции и при отходе от оптической оси. При этом изменение поляризации световых пучков в пределах рабочего диапазона определяется только оптической анизотропией кристалла, а не оптической активностью материала, и, как следствие, выражено существенно менее ярко, чем в случае дифракции вблизи одной из оптических осей двуосного кристалла. Этот факт позволяет существенно расширить угловой и частотный диапазоны АО ячейки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-07-00369-а.

Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
2. Xu J., Stroud R. Acousto-optic devices. N.Y.: Wiley, 1992.
3. Balakshy V.I., Kupreychik M.I. // Phys. Wave Phenom. 2016. V. 24. P. 58.
4. Balakshy V.I., Kupreychik M.I. // Opt. Spectrosc. 2017. V. 123. P. 463.
5. Balakshy V.I., Kupreychik M.I. // Applied Optics. 2018. V. 57. P. 5549.

В.В. ПРОКЛОВ, А.В. ЛУГОВСКОЙ

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

О МЕТОДЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СОГЛАСОВАННОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

В настоящее время наряду с традиционными методами идентификации малых объектов в гиперспектральной области сформировался новый альтернативный подход на базе недавно разработанных параллельных многополосных акустическооптических фильтров излучения (МАОФ). В данной работе дается первое теоретическое обоснование возможности идентификации объектов с минимальной затратой времени при использовании метода согласованной АО-фильтрации.

V.V. PROKLOV, A.V. LUGOVSKOI

Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

ABOUT THE REMOTE OBJECTS IDENTIFICATION METHOD BASED ON THE MATCHED ACOUSTIC OPTICAL FILTRATION OF SPECTRAL SIGNALS

Nowadays, along with traditional methods for identifying small objects in the hyperspectral region, a new alternative approach based on the recently developed parallel multiband acousto-optic filters (MAOF) has been formed. This paper presents the first theoretical justification for the possibility of identifying objects with a minimum expenditure of time when using the method of matched AO filtering.

В данной работе дается новый теоретический подход к важной задаче идентификации оптических сигналов, отраженных от удаленных объектов, на основе использования новой технологии – многоканальной акустическооптической фильтрации (МАОФ) [1]. Получено аналитическое решение задачи в многомерном Евклидовом векторном пространстве, представляющем собой вещественное пространство с положительно определенными модулем вектора и скалярного произведения двух векторов [2]. В данном пространстве, как известно, можно осуществлять линейные преобразования координатного базиса без изменения модулей векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} , так и величины их скалярных произведений $(\mathbf{a} \bullet \mathbf{b}) = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cdot \cos(\mathbf{a} \ \mathbf{b})$, где $|\mathbf{a}| = (\mathbf{a}_{\lambda_1}^2 + \mathbf{a}_{\lambda_2}^2 + \dots)^{1/2}$, $|\mathbf{b}| = (\mathbf{b}_{\lambda_1}^2 + \mathbf{b}_{\lambda_2}^2 + \dots)^{1/2}$,

$\mathbf{a}_{\lambda i}^2$ и $\mathbf{b}_{\lambda i}^2$ – квадраты векторных проекций на базисные орты ортогональной системы координат, $i = 1, 2, 3 \dots$. Установлено, что в этом случае поставленная задача сводится к определению одного из множества возможных векторных образов объектов, занимающего некоторую часть пикселя совместно с известным образом фона. При использовании согласованной фильтрации на базе трех программируемых МАОФ решение задачи сводится к решению одного «эволюционного уравнения», связывающего между собой угловые характеристики векторных образов с результатами трех измерений мощностей света на выходе каждого фильтра, а именно, I_1, I_2 и I_3 , что можно представить в виде:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{Y} - \mathbf{I}) \mathbf{C} + \mathbf{Z}, \quad (1)$$

где $\mathbf{C} = (\mathbf{I}_3 \mathbf{Z} - \mathbf{I}_1) / (\mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_2)$, $\mathbf{X} = \cos^2 \varphi_{1\Gamma}$, $\mathbf{Y} = \cos^2 \varphi_1$, $\mathbf{Z} = \cos^2 \varphi_{\Gamma}$, а $\varphi_1 = (a_1 b)$, $\varphi_{\Gamma} = (a_{\Gamma} b)$, $\varphi_{1\Gamma} = (a_{1\Gamma} b)$ – все три возможных угла ортами фона, истинного и гипотетического объектов.

Анализ показывает, что функция $X(Y)$ представляет собой линию эволюцию величины \mathbf{X} от принятия предполагаемой гипотезы ($\mathbf{Z}_{\Gamma} = \cos^2 \varphi_{\Gamma}$) до условия определения истинного значения объекта $\mathbf{Y}_{\text{ист.}}$ (когда $X = 1$), откуда получим выражение:

$$\mathbf{Y}_{\text{ист.}} = [(\mathbf{I}_3 + \mathbf{Z}_{\Gamma} \mathbf{I}_2) - (\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2)] / (\mathbf{Z}_{\Gamma} \mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_1). \quad (2)$$

Подробное рассмотрение показало, что предлагаемый подход к методу идентификации малых объектов в гиперспектральной области оптического отражения в принципе позволяет реализовать задачу идентификации в реальном времени, хотя для этого, конечно, дополнительно потребуется решение таких непростых проблем, как обеспечение достаточного числа спектральных выборок, высокой точности АО-измерений, и т.п.

Работа поддержана грантом РФФИ №16-02-00124-А.

Список литературы

1. Бышевский-Конопко О.А., Проклов В.В., Луговской А.В. // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 10. С. 1-5.
2. Feynman R., Leighton R., Sands M. 2005. Chapter 11.

А.С. МАЧИХИН^{1,2}, А.Б. КОЗЛОВ^{1,3}, Д.Д. ХОХЛОВ^{1,2},
В.Э. ПОЖАР¹, С.В. БОРИТКО¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

³НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА В РЕЖИМЕ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Рассмотрена задача создания акустооптического перестраиваемого фильтра изображений с адаптивно управляемой шириной полосы пропускания. Для ее решения используется линейная частотная модуляция управляющего высокочастотного сигнала. С помощью разработанного широкоапертурного фильтра видимого диапазона исследована форма функции пропускания при различных параметрах модуляции. Показано, что ее ширину можно адаптивно изменять в диапазоне 2 - 100 нм.

A.S. MACHIKHIN^{1,2}, A.B. KOZLOV^{1,3}, D.D. KHOKHLOV^{1,2},
V.E. POZHAR¹, S.V. BORITKO¹

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

²National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

³POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow

ANALYSIS OF A TRANSFER FUNCTION OF A WIDE-APERTURE ACOUSTO-OPTIC TUNABLE FILTER IN THE LINEAR FREQUENCY MODULATION MODE

The task of creating an acousto-optical tunable imaging filters with an adaptively controlled bandwidth is considered. To solve it, linear frequency modulation of the high-frequency signal is used. With the help of the developed wide-aperture filter of the visible range, the shape of the transmission function was studied under various modulation parameters. It is shown that its width can be adaptively changed in the range of 2-100 nm.

В основе акустооптической (АО) спектральной фильтрации излучения лежит дифракция света на ультразвуковой волне. Положение выделяемого спектрального интервала определяется пространственным периодом брэгговской решетки, динамически создаваемой в кристалле этой волной,

зависящим от частоты f высокочастотного (ВЧ) электрического сигнала, подаваемого на пьезоизлучатель ультразвука.

АО фильтры обеспечивают быструю произвольную спектральную адресацию с возможностью управления шириной окна пропускания [1]. Одним из эффективных способов такого управления шириной полосы пропускания АО фильтров является быстрая линейная частотная модуляция (ЛЧМ) управляющего ВЧ сигнала [2, 3]. В отличие от одночастотного режима работы, в котором эта ширина (в единицах оптической частоты $\nu \equiv 1/\lambda$) определяется длиной рабочей части решетки ($\Delta\nu_{\text{мч}} \sim 1/L$), при ЛЧМ ширина определяется шириной спектра управляющих частот ($\Delta\nu_{\text{лчм}} \sim \Delta f$), поскольку индуцированная дифракционная решётка становится неоднородной по сечению светового пучка. Разработанные средства генерации позволяют модулировать ВЧ сигнал не только по линейному, но и по иным законам, что приводит к различным формам окна пропускания. Этим удается обеспечить контролируемое изменение положения, формы и ширины окна пропускания АО фильтра посредством изменения средней частоты управляющего сигнала, величины и закона девиации частоты ($f_{\text{min}}, f_{\text{max}}$), а также периода повторения этого ВЧ пакета (рис. 1).

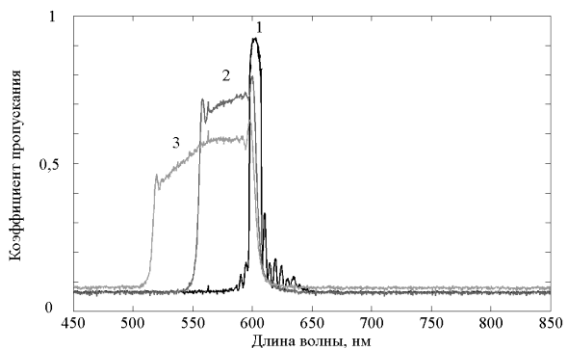


Рис. 1. Окна пропускания АО фильтра в одночастотном режиме (1) и в режиме модуляции при $\Delta f = 10$ МГц (2) и $\Delta f = 20$ МГц (3)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-29-20095).

Список литературы

1. Магдич Л.Н. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 49. № 2. С. 387-390.
2. Мазур М.М., Судденко Ю.А., Шорин В.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. № 4. С. 56-62.
3. Мазур М.М., Мазур Л.И. и др. // Оптика и спектроскопия, 2018. Т. 125. № 4. С. 572-576.

Г.С. РОГОЖНИКОВ, В.В. РОМАНОВ, К.Б. ЮШКОВ¹

*Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ ЗАЩИЩЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложена концепция территориально-распределенной сети передачи данных в свободном пространстве, имеющей высокую степень защищенности от несанкционированного доступа. Защита данных обеспечивается на физическом уровне с использованием принципа интерференции составляющих полезного сигнала на поверхности удаленного приемника.

G.S. ROGOZHNIKOV, V.V. ROMANOV, K.B. YUSHKOV¹

All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

¹*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

DISTRIBUTED FREE-SPACE OPTICAL NET FOR SECURE COMMUNICATIONS

We propose the concept of the distributed net for secure free-space communications with high immunity to the unauthorized access. Data protection is provided on the physical layer by means of interference of the signal components on the surface of the remote receiver.

В [1] нами был предложен способ организации защищенной оптической связи в свободном пространстве между двумя абонентами, находящимися в условиях прямой видимости. Способ основан на интерференции chirпированных (упорядоченных по частоте) сверхкоротких лазерных импульсов, разнесенных в пространстве и расфазированных при помощи акусто-оптических модуляторов, непосредственно на поверхности приемника излучения, что исключает возможность перехвата данных посредством регистрации излучения, рассеянного средой, разделяющей абонентов. В патенте [2] показано, что сигнал, полученный в процессе интерференции chirпированных лазерных импульсов возможно усилить до значений, позволяющих существенно увеличить дистанцию между абонентами, что может являться предпосылкой к созданию распределенной сети связи.

Очевидным решением, позволяющим расширить число абонентов в разы, является организация радиальной топологии сети, когда данные от каждого абонента транслируются через т.н. центральный узел связи (ЦУС) [3]. А размещение ЦУС на значительном расстоянии над поверхностью Земли, например, на ее искусственном спутнике, или беспилотном летательном аппарате, приблизит количество абонентов к значениям, достижимым в современных системах спутниковой радиосвязи [4].

Проведен анализ различных конфигураций распределенных сетей защищенной связи, основанных на использовании способа физической защиты, предложенного в [1], выявлены «узкие места», рассчитаны оптимальные варианты реализации концепции в рамках существующей материально-технической базы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-07-00670).

Список литературы

1. Rogozhnikov G.S., Romanov V.V., Rukavishnikov N.N., Molchanov V.Ya., Yushkov K.B. // Appl. Opt. 2018. V. 57. P. 98-102.
2. Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Соколовский С.В., Сухарев С.А. // Патент РФ №128020. 2012.
3. Замарин А.И., Тавалинский Д.А., Гришин М.В. // Информация и космос. 2004. № 3. С. 82-92.
4. Joo Ch., Choi J. // Journ.Comm.and Networks. 2018. V. 20. Is. 1. P. 102-108.

Е.В. АРТЕМОВ^{1,2}, И.А. КОПАЕВ², О.Е. НАНИЙ^{1,2},
В.Н. ТРЕЩИКОВ²

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

ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ СОСТАВНОЙ МОДУЛЯТОР СО СДВИГОМ ЧАСТОТЫ

В докладе представлен подход к созданию амплитудно-частотного модулятора на основе трех электрооптических модуляторов Маха-Цандера, реализующий частотный сдвиг выходного излучения. На ряду с обсуждением модели, представлена схема экспериментальной установки и измерены основные характеристики электрооптической системы.

E.V. ARTEMOV^{1,2}, I.A. KOPAEV², O.E. NANIY^{1,2},
V.N. TRESHCHIKOV²

¹*Lomonosov Moscow State University*
²*T8 Ltd, Moscow*

PULSE ELECTROOPTIC COMPOSITIONAL MODULATOR WITH FREQUENCY SHIFT

The report presents an approach to creating an amplitude-frequency modulator based on three Mach-Zander electro-optical modulators that implements the frequency shift of the output radiation. Along with the discussion of the model, a diagram of the experimental setup is presented and the main characteristics of the electro-optical system are measured.

Электрооптические модуляторы Маха-Цандера на основе ниобата лития играют ключевую роль в цифровой волоконно-оптической связи [1]. Они обладают множеством достоинств, таких как малые оптические потери, широкая полоса пропускания, высокий динамический диапазон. Однако, для решения современных задач радиофотоники и когерентной рефлектометрии зачастую применяются подходы, основанные на применении нескольких электрооптических модуляторов (ЭОМах) и акустооптических модуляторов (АОМах) [2]. Такие схемы, как правило, состоят из сочетания последовательных, параллельных или сформированных более сложным соединением нескольких электрооптических модуляторов [3-5].

Целью данной работы является разработка модели амплитудно-частотного составного модулятора для управления частотным сдвигом и практическая проверка работоспособности модели. Частотный сдвиг представляет из себя однополосную модуляцию сигнала с подавлением несущей частоты. Выполненные расчеты спектра выходного излучения модулятора показали, что для решения поставленной задачи необходимо использовать составной модулятор на базе трех интерферометров Маха-Цандера. Первые два интерферометра соединены параллельно, а третий подключен к ним последовательно. В то же время работа в заданном режиме требует приложения напряжения определенным способом к каждому из ЭОМов, что представлено на рис. 1. Также в ходе работы проведены исследования по измерению параметров разработанной схемы, таких как коэффициент экстинкции модулятора, рабочая полоса, время переключения.

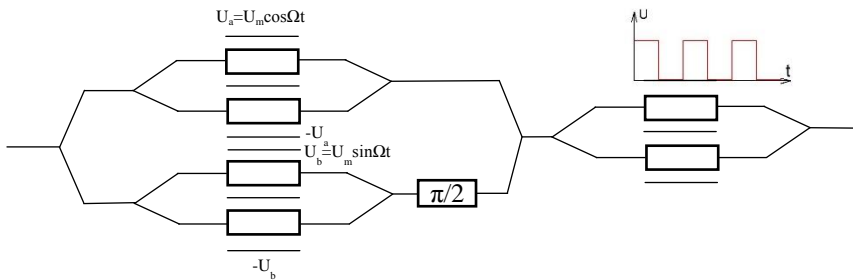


Рис. 1. Схема разработанного составного модулятора

Список литературы

1. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. // DWDM-системы. Москва: Техносфера, 2017.
2. Tang Y., Shieh W. // IEEE Photonics technology letters. 2007. V. 19. No. 7. P. 483-485.
3. Shimotsu S., Oikawa S., et. al. // IEEE Photonics technology letters. 2001. V. 13. No. 4. P. 364-366.
4. Smith G., Novak D., et. al // Electronics letters. 1997. V. 33. No. 1. P 74-75.
5. Higuma K., Hashimoto Y., et. al. // Electronics letters. 2001. V. 37. No. 8. P. 515-516.

В.И. ТЕЛЕСHEВСКИЙ, С.В. БУШУЕВ, С.Г. ГРИШИН¹

Московский государственный технологический университет «Станкин»

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

СПОСОБ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ В ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Предложен способ электронного управления фазовым сдвигом в лазерных измерительных интерференционных системах с использованием свойств акустооптического взаимодействия, в результате которого световой луч дифрагирует на ультразвуковой волне. Описаны параметры оптической схемы и схемы электронного управления, а также режимы работы акустооптического модулятора для получения управляемого фазового сдвига.

V.I. TELESHEVSKY, S.V. BUSHUEV, S.G. GRISHIN¹

Moscow State Technological University «Stankin»

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

METHOD OF PHASE SHIFT'S ELECTRONIC CONTROL IN LASER INTERFERENCE MEASUREMENT SYSTEMS

Presents a method for electronic control of the phase shift in laser interference measurement systems with using the properties of acousto-optic interaction: a light beam diffraction on an ultrasonic wave. The parameters of the optical circuit and the electronic control circuit was described. Were suggested operating modes of the acousto-optic modulator for obtaining a controlled phase shift.

Метод управления фазовым сдвигом широко применяется в интерферометрах, построенных по разнообразным оптическим схемам по схемам Линника, Кестерса, Физо, Тваймана-Грина и др. [1]. В настоящее время осуществление фазового сдвига реализуется одним известным способом – установкой в одно из плеч двухлучевого интерферометра (как правило, в опорное плечо) электро-механического двигателя (актюатора), который под действием электрического напряжения или тока осуществляет смещение зеркала на определённую величину в пространстве, т.е. сдвигает пространственную фазу опорной волны и, следовательно, всей интерференционной картины. Данный метод обладает рядом недостатков: слабой помехозащищённостью системы амплитудного управления актюатором, ограниченной точностью и малым числом

реализуемых фазовых сдвигов, потребностью в высоких напряжениях и токах (до сотен вольт) для управления актюатором, наличие гистерезиса, старения, низкий уровень быстродействия механических систем.

Целью работы является исключение из состава действий, управляющих фазовым сдвигом в интерференционных системах, механических перемещений. Отличительной особенностью предлагаемого способа электронного управления фазовым сдвигом является использование в нём определённых свойств акустооптического взаимодействия. Фазовый сдвиг опорного и предметного световых пучков от общего источника формируют за счет их брэгговской дифракции на одинаковые по номеру и знаку порядки путем пропускания через идентичные акустооптические модуляторы, на которые подают опорные колебания U_1 и U_2 так, что $U_1 = U_0 \exp[-i(2\pi ft + \Delta\phi)]$ и $U_2 = U_0 \exp[-i2\pi ft]$, возбуждаемые от общего генератора 9. На рис. 1 представлена предлагаемая схема реализации управляемого фазового сдвига с помощью двух акустооптических модуляторов 7 и 8, +1 порядка дифракции от которых поступают соответственно в сигнальное E_1 и опорное E_2 плечо интерферометра. Сдвиг фаз реализуется на фазосдвигающем устройстве 10 с помощью блока управления 11, задающего электронно управляемую задержку сигнала от генератора на величину $\Delta\phi$. Экспериментальная разработанная схема управления фазовым сдвигом обеспечивает до 256 фазовых сдвигов в пределах половины длины световой волны [2].

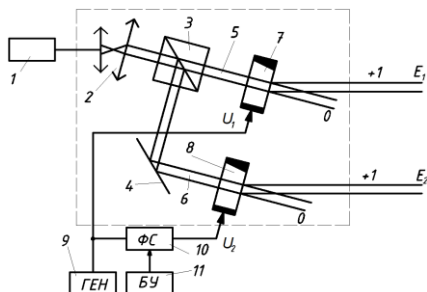


Рис. 1. Схема системы электронного управления фазовым сдвигом

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Телешевский В.И., Андреев А.Г., Игнатьев П.С., Индукаев К.В., Кольнер Л.С., Осипов П.А. Метрологическая аттестация лазерных микроскопов на основе принципов модуляционной интерферометрии с управляемым фазовым сдвигом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 3(34). С. 67-75.

2. Телешевский В.И., Гришин С.Г., Бушуев С.В. Способ управления фазовым сдвигом в интерференционных системах. Патент РФ № 2640963 // Бюл. № 2. Оpubл. 12.01.2018.

А.С. ПОДЛЕСНАЯ¹, С.Н. ЛУКИНЫХ¹, О.Е. НАНИЙ^{1,2},
В.Н. ТРЕЩИКОВ¹

¹ООО «Т8», Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПОМЕХ В ВОЛОКОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Стандартные DWDM (dense wavelength division multiplexing) системы волоконной оптической связи включают в себя 40 каналов на спектральном расстоянии 100 ГГц друг от друга или 80 каналов на расстоянии 50 ГГц. При спектральном сближении каналов могут возникать перекрестные помехи. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования линейных перекрестных помех для случая двух каналов.

A.S. PODLESNAYA¹, S.N. LUKINYKH¹, O.E. NANII^{1,2},
V.N. TRESHCHIKOV¹

¹T8 Ltd, Moscow

²Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF LINEAR CROSS NOISES IN FIBER OPTICAL SYSTEMS OF COMMUNICATION

Typical DWDM (dense wavelength division multiplexing) systems of fiber optical communication use 40 channels at 100 GHz spacing or 80 channels with 50 GHz spacing. While reducing spectral spacing between the channels linear cross noises may appear. In this paper, we presents the results of the experimental investigation of linear cross noises in case of two channels.

Последние рекорды по скорости передачи данных были установлены с использованием передачи информации по суперканалам [1]. Суперканал представляет собой несколько (обычно порядка десяти) близко расположенных в спектре оптических каналов (несущих частот), по которым параллельно передается информация. Например, в [2] были проведены исследования для суперканала, состоящего из трех поднесущих частот на спектральных расстояниях 75, 68,5, 65,5 и 64 ГГц. Однако спектральное сближение каналов резко увеличивает перекрестные помехи в каналах, что существенно снижает дальность передачи информации.

Для теоретического описания использована модель, аналогичная феноменологической GN-модели [3, 4]. Искажения в канале, вызванные

влиянием соседних каналов, представляют собой шум линейных перекрестных помех. Измеряемым параметром являлось отношение сигнала к шуму линейных перекрестных помех $OSNR_x$. Измерения проведены в схеме back-to-back для случая двух каналов на спектральном расстоянии $\Delta\nu = 100, 50, 37.5, 33$ ГГц без и с добавлением шума усиленного спонтанного излучения. Ширина спектра канала на полувысоте $\Delta\nu_{\text{канала}} = 37\div 38$ ГГц.

В ходе эксперимента установлен следующий вид зависимости обратного $OSNR_x$ от спектрального расстояния между каналами (рис. 1). Видно, что при спектральном расстоянии между каналами, меньшем 40 ГГц, сильно возрастают линейные перекрестные помехи. Для спектрального расстояния, большего 40 ГГц, перекрестные линейные помехи оказывают гораздо меньшее воздействие.

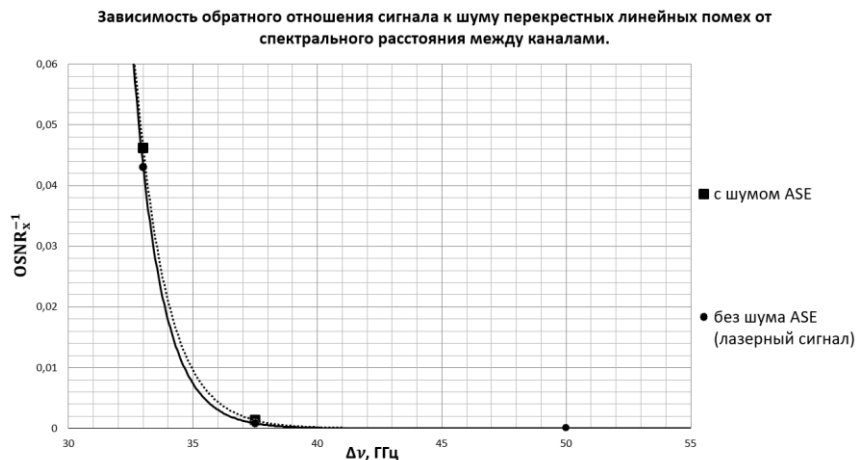


Рис. 1. Зависимость обратного отношения сигнала к шуму перекрестных линейных помех от расстояния между каналами

Список литературы

1. Трешиков В.Н. Разработка DWDM-системы ёмкостью 25 Тбит/с // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. 2013. № 2 (106). С. 25.
2. Zhou Y.R., Smith K., et. al. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online), 2018.P. M1E.4.
3. Листвин В.Н., Трешиков В.Н. DWDM-системы // Москва: Техносфера, 2017.
4. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Плаксин С.О., Трешиков А.Н., Убайдуллаев Р.Р. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK // Квантовая электроника. 2013. № 43 (6). С. 550-553.

С.И. ИВАНОВ, А.П. ЛАВРОВ, И.И. САЕНКО

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕЛЕНГАЦИИ
ИСТОЧНИКОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ
В РАДИОФОТОННОМ ДИАГРАММОФОРМИРУЮЩЕМ
УСТРОЙСТВЕ ЛИНЕЙНОЙ ФАР**

Рассмотрена возможность реализации дополнительной функции уточнения направления на источник широкополосного излучения в радиофотонном диаграммоформирующем устройстве для линейной фазированной антенной решетки. Для оценки относительной задержки сигналов с двух элементов антенной решетки и, таким образом, пеленга источника сигналов, используется характеристика передачи радиофотонного трансверсального фильтра. Фильтр сформирован на базе двух каналов самого диаграммоформирующего устройства. Приведены результаты тестовых измерений характеристик трансверсального фильтра, в том числе и его дискриминационного коэффициента.

S.I. IVANOV, A.P. LAVROV, I.I. SAENKO

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**EXPANDING THE POSSIBILITY OF BROADBAND SIGNAL
SOURCES DIRECTION FINDING IN MICROWAVE
PHOTONIC BEAMFORMING SYSTEM FOR LINEAR PAA**

The possibility of implementing an additional function of determining the direction to source of broadband radiation in microwave photonic beamforming system for a linear phased antenna array is considered. Source direction estimation is fulfilled in microwave photonic transversal filter. The filter is formed on the basis of two channels of photonic beamforming system itself. The results of test measurements of characteristics of 2 photonic beamforming systems, and characteristics of microwave photonic transversal filter, including its discriminatory coefficient, are given.

Для обеспечения работы линейной фазированной антенной решетки (ФАР) в мгновенной полосе частот в несколько октав нами разработаны 2 макета радиофотонных диаграммоформирующих устройств (ДФУ) [1, 2], реализующих для управления лучом ФАР принцип «true-time-delay» после преобразования принимаемых СВЧ сигналов на оптические несущие. В ДФУ используется плотное волновое мультиплексирование – технологии DWDM с шагом 100 ГГц по частоте в диапазоне 1,5 мкм. Наборы

межэлементных (межканальных) временных задержек для формирования лучей ФАР были выполнены на основе использования дисперсии в одномодовом оптическом волокне SMF-28 разной длины [1] и на основе чирпированных волоконных брегговских решеток [2]. Эти макеты ДФУ имели мгновенную полосу рабочих частот 1..18 ГГц. Ширина диаграммы направленности (ДН) ФАР оценивается соотношением $\theta \approx \lambda_R/d \cdot (N-1)$, где λ_R – длина волны СВЧ-сигнала, d – шаг расположения элементов ФАР, N – количество элементов. Ширина ДН (и угловое разрешение) ФАР меняются при работе в такой широкой полосе частот, и поэтому пеленг источников может быть недостаточно точным.

В радиофотонных ДФУ возможно реализовать, при небольшой модификации, одновременно с формированием диаграммы ФАР дополнительно и функцию пеленгации широкополосных источников сигнала [3]. Эта задача решается путем организации радиофотонного трансверсального фильтра по сигналам с двух элементов ФАР, задержанных друг относительно друга на оптической несущей в оптическом тракте. Трансверсальный фильтр проявляет себя как СВЧ режекторный фильтр, он имеет периодическую АЧХ с периодом $f = 1/t_F$, t_F – взаимная временная задержка, введенная в каналы фильтра. При управлении величиной задержки t_F частота подавления f_0 фильтра перестраивается, и она может быть настроена на полосу частот приходящего на ФАР широкополосного сигнала. При изменении пеленга $\Delta\theta$ источника сигнала изменяется взаимная задержка Δt_S сигналов, приходящих на 2 выбранных элемента ФАР: $\Delta t_S = [L \cdot \cos(\theta) \cdot \Delta\theta]/c$, L – расстояние между элементами, c – скорость распространения э.-м. волн. Итоговая задержка сигналов в каналах фильтра составит $t_F \pm \Delta t_S$, что приводит к изменению Δf_0 положения частоты подавления f_0 фильтра. Изменение частоты Δf_0 однозначно связано с изменением пеленга $\Delta\theta$. Изменение в спектре сигнала регистрирует анализатор спектра, включенный на выходе фильтра. В докладе приведены как результаты измерения управляемой ДН для ФАР с макетами сверхширокополосных радиофотонных ДФУ, так и характеристики макета радиофотонного двухканального трансверсального фильтра при управлении его временной задержкой t_F , в том числе и его дискриминационного коэффициента.

Список литературы

1. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I. // LNCS. 2015. V. 9870. P. 670-679.
2. Ivanov S.I., Lavrov A.P., et. al. // Proc. SPIE, 2018. V. 10774. P. 107740W.
3. Vidal B., Piqueras M.A., Marti J. // J. of Lightwave Technology. 2006. V. 24(7). P. 2741-2745.

Д.С. ЗЕМЦОВ^{1,2}, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ¹, В.А. НЕБАВСКИЙ¹,
Р.С. СТАРИКОВ¹, И.Ж. ХАФИЗОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Научно-технический центр «Модуль», Москва

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФОТОННОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ВЫБОРКОЙ

В работе приведены три различных методики обработки широкополосного радиосигнала в фотонном аналого-цифровом преобразователе с псевдослучайной дискретизацией. Представлены результаты численного моделирования обработки широкополосного радиосигнала с известными локальными полосами гармонических составляющих.

D.S. ZEMTSOV^{1,2}, E.Yu. ZLOKAZOV¹, V.A. NEBAVSKIY¹,
R.S. STARIKOV¹, I.Zh. KHAFIZOV^{1,2}

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

²Scientific and Technical Centre "Module", Moscow

PSEUDORANDOM PHOTONIC ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTOR DATA PROCESSING

Three methods of pseudorandom photonic analog-to-digital convertor data processing are presented in the article. Also results of broadband radio frequency signal processing modeling are included in the article. In the modeling every harmonic of the signal has it's own local band.

Фотонные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) становятся все более популярными объектами исследований благодаря своим уникальным характеристикам, таким как широкие полосы обрабатываемых сигналов, высокое быстродействие, низкие значения фазовых шумов [1].

Одна из ключевых проблем фотонных АЦП – огромные объемы данных, а также необходимость в быстродействующих электронных АЦП, использующихся в качестве выходных элементов схемы. Один из вариантов решения этой проблемы – использование псевдослучайной выборки [2, 3]. Восстановление сигнала по данным псевдослучайной выборки предполагает разреженность в спектре сигнала, однако в общем случае гармонический состав сигнала неизвестен.

Пусть исследователь обладает неограниченными вычислительными мощностями, тогда наиболее рациональным восстановлением спектра сигнала будет последовательное скалярное произведение вектора, соответствующего псевдослучайной выборке и векторов, соответствующих всевозможным гармоникам, которые определены в тех же временных отсчетах. Ситуация, соответствующая неограниченным вычислительным мощностям, недостижима, кроме того выигрыш в объеме данных псевдослучайной выборки в таком случае теряется.

Вторым вариантом нахождения спектра сигнала является выборочное скалярное произведение, если исследователь знает, какие гармоники ему интересны. Можно также учесть небольшие локальные полосы в окрестностях каждой из гармоник. Спектры, восстановленные по эквидистантной и псевдослучайной выборкам представлены на рис. 1 и 2.

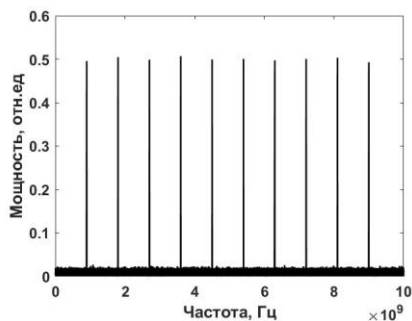


Рис. 1. Спектр многоканового сигнала, выбранного эквидистантно

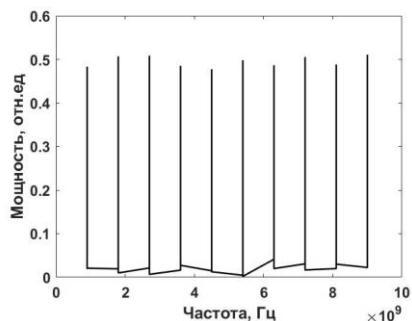


Рис. 2. Спектр многоканового сигнала, выбранного псевдослучайно

В случае псевдослучайной выборки отсчеты следуют в десять раз реже. Кроме того, сигнал анализируется на наличие гармоник в узких локальных полосах в окрестности спектральных компонент.

Третий метод анализа псевдослучайной выборки заключается в минимизации находящихся в пустой полосе коэффициентов разложения сигнала в базис гармонических функций. Такой подход позволяет итеративно найти все гармоники выше уровня шумов и в дальнейшем изучать сигнал только на наличие этих гармоник.

Список литературы

1. Стариков Р.С. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3-39.
2. Donoho D.L. // IEEE Transactions on Information Theory. 2006. V. 4 (52). P. 1289-1306.
3. Clark T.R., et. al. // Journal of Lightwave Technology. 2016. V. 11 (34). P. 2848-2855.

А.Э. ДЕГТЕРЕВ, М.А. ЕРЕМЕЕВ, И.И. МИХАЙЛОВ,
И.А. ЛАМКИН, С.А. ТАРАСОВ
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СЛОИ И КОЛЛОИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

Были созданы органические светоизлучающие структуры, содержащие коллоидные квантовые точки селенида кадмия в активном слое. Полученные OLED продемонстрировали значительное изменение спектральных характеристик, а также увеличение эффективности за счет высокого квантового выхода люминесценции ККТ. Были определены необходимые условия для образования качественных органических слоев для таких материалов, как TPD и Alq₃, методом вакуумного термического осаждения.

A.E. DEGTEREV, M.A. EREMEEV, I.I. MIKHAILOV,
I.A. LAMKIN, S.A. TARASOV
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

RESEARCH OF LIGHT-EMITTING STRUCTURES, CONTAINING ORGANIC LAYERS AND COLLOIDAL QUANTUM DOTS

Light-emitting structures that contain colloidal quantum dots of cadmium selenide in the active layer were created. Obtained OLEDs have demonstrated a significant change in the spectral characteristics, as well as an increase in the efficiency due to a high luminescence quantum yield of CQD. Conditions and the reasons for a better formation of organic layers for such materials as TPD and Alq₃ by the method of vacuum thermal deposition were determined.

Исследование коллоидных квантовых точек (ККТ) и создание приборов на их основе, таких как органические светоизлучающие диоды (OLED), является одним из наиболее многообещающих направлений в современной фотонике. Благодаря высокому квантовому выходу люминесценции ККТ, включенных в активный слой OLED, возможно создание качественных матриц дисплеев с повышенной эффективностью и высокой цветопередачей [1].

OLED состоит из прозрачной подложки и анода, двух или больше пленок органических соединений, являющимися транспортными слоями для дырок и электронов, и катода [2]. В данной работе были созданы светоизлучающие органические структуры, содержащие в составе активного слоя коллоидные квантовые точки CdSe с широкозонной оболочкой ZnS, излучающие на длине волны 680 нанометров. Было продемонстрировано (рис. 1), что внедрение ККТ приводит к возникновению второго пика, интенсивность которого зависит от подаваемого напряжения и концентрации используемых наночастиц. Смещение максимума электролюминесценции Alq3 обусловлено влиянием эффектов внутреннего поглощения в массиве ККТ.

В процессе создания структур использовался метод вакуумного термического осаждения. Для данного метода было экспериментально выявлено, что на качество получаемых светодиодов влияет температура подогрева стеклянных подложек на которые наносятся органические соединения. Чтобы определить однородность создаваемых слоев TPD и Alq3 при разных температурах проводилось исследование фотолуминесценции материалов по всей площади образца с применением сканирующего возбуждающего лазерного пучка. Затем была рассчитана оптическая мощность излучения из спектральных характеристик и составлены поверхности отклонения мощности излучения фотолуминесценции от среднего значения для различных температур подогрева подложки. В итоге наиболее однородный слой Alq3 создается, когда подложка нагрета до 60 °С (рис. 2), а для TPD до 50 °С.

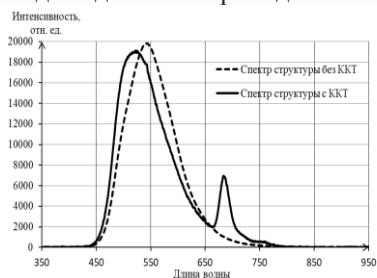


Рис. 1. Спектры электролюминесценции изготовленных структур с коллоидными квантовыми точками CdSe/ZnS и без ККТ

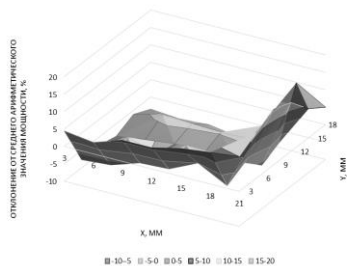


Рис. 2. Поверхность отклонения мощности излучения фотолуминесценции Alq3, осажденного при температуре подложки 60 °С, от среднего значения мощности

Список литературы

1. Tarasov S.A., Aleksandrova O.A., Lamkin I.A., et. al. // Electronics. 2014. V. 108. P. 21-26.
2. Stepanov E.M., Mikhailov I.I., Tarasov S.A., Solomonov A.V. // EIConRusNW. 2016. P. 82-84.

В.В. ГОРБЯК, А.И. СИДОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

САМОФОКУСИРОВКА НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ В СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩЕМ СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ

В данной работе демонстрируется возможность самофокусировки непрерывного УФ-излучения на длине волны 325 нм лазера He-Cd в серебросодержащем силикатном стекле. Взаимодействие излучения и материала таково, что в образце формируется люминесцентный конус. После термообработки ниже температуры стеклования размеры люминесцентного конуса увеличиваются и незначительно изменяется спектр люминесценции.

V.V. GORBYAK, A.I. SIDOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

SELF-FOCUSING OF THE CONTINUOUS LASER UV-RADIATION IN THE SILVER-CONTAINING SILICATE GLASS

In this research was demonstrated the opportunity of the self-focusing of continuous UV-radiation ($\lambda = 325$ nm) of He-Cd laser in silver-containing silicate glass. Interaction between laser radiation and material is such that in the material is formed the luminescence cone. After thermal treatment with temperature, lower than glass transition temperature the size of the luminescent cone is increase and the spectrum of the luminescence is a little bit changed.

Исследуемый материал был синтезирован в университете ИТМО. Состав: $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_2\text{O-NaF-NaCl}$ с добавлением Ag_2O , CeO_2 и Sb_2O_3 . Облучение проводилось с помощью ртутной лампы и He-Cd лазера ($\lambda = 325$ нм), образец был термообработан (ТО) при температуре ниже температуры стеклования (T_g) в муфельной печи. Спектры люминесценции и поглощения получены с помощью спектрофлуориметра и спектрофотометра, соответственно.

В процессе облучения He-Cd лазером в серебросодержащем силикатном стекле формируется люминесцентный конус. Это происходит благодаря тому, что заряженные молекулярные кластеры серебра под воздействием УФ-излучения трансформируются в нейтральные, что увеличивает диэлектрическую проницаемость среды, а следовательно, и

её показатель преломления [1, 2]. Таким образом, в образце формируется положительная линза, что и приводит к самофокусировке непрерывного УФ лазерного излучения.

После ТО при температуре 350 °С люминесцентная область увеличивается (рис. 1), так как увеличивается количество нейтральных молекулярных кластеров [1, 2]. Интенсивность люминесценции в облученной области растет и спектр люминесценции становится более широким по сравнению со спектром люминесценции облученной области до ТО (рис. 2).



Рис. 1. Фотография люминесценции образца после облучения He-Cd лазером и термообработки при температуре ниже T_g , длина волны возбуждения 405 нм

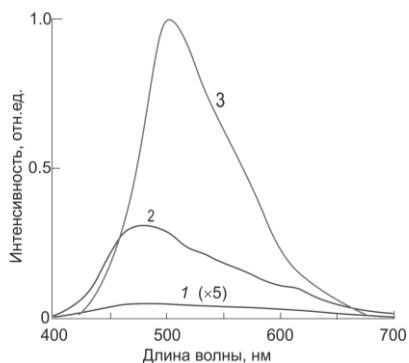


Рис. 2. Спектры люминесценции серебросодержащего силикатного стекла:
1 - чистое стекло, 2 - после облучения He-Cd лазером,
3 - после облучения He-Cd лазером и ТО ниже T_g

Список литературы

1. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // Optical Materials. 2014. V. 36. P. 753-759.

2. Gorbiak 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.

А.В. ЕЛОПОВ¹, О.Н. КАРПОВ², В.Б. ЗАЙЦЕВ¹, Д.М. ЖИГУНОВ³,
Г.А. ШАНДРЮК², А.А. ЕЖОВ^{1,2}, А.С. МЕРЕКАЛОВ²,
Л.А. ГОЛОВАНЬ¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва

³Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.

СПЕКТРЫ И КИНЕТИКА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СЕЛЕНИДА КАДМИЯ, ВНЕДРЕННЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОЛИМЕРНУЮ МАТРИЦУ

Измерены спектры фотолюминесценции (ФЛ), возбуждения ФЛ и кинетики ФЛ нанокompозитных структур на основе жидкокристаллического полимера (ЖКП), содержащих квантовые точки CdSe или CdSe/ZnS. Спектр ФЛ содержит две полосы, связанные с экситонами и дефектными состояниями, последняя полоса подавляется при использовании квантовых точек с оболочкой ZnS. Сравнение с нанокompозитами на основе аморфной матрицы свидетельствуют о большем квантовом выходе ФЛ в случае матрицы ЖКП.

A. V. ELOPOV¹, O. N. KARPOV², V. B. ZAYTSEV¹,
D. M. ZHIGUNOV³, G. A. SHANDRYUK², A. A. EZHOV^{1,2},
A. S. MEREKALOV², L. A. GOLOVAN¹

¹Lomonosov Moscow State University

²A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, Moscow

³Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region

SPECTRA AND KINETICS OF PHOTOLUMINESCENCE OF CADMIUM SELENIDE QUANTUM DOTS EMBEDDED INTO LIQUID-CRYSTAL POLYMER MATRIX

Photoluminescence (PL) and PL excitation spectra as well as PL kinetics were measured in nanocomposites based on liquid-crystal polymer (LCP) with embedded CdSe or CdSe/ZnS quantum dots. PL spectra consist of two bands corresponding to excitons and defect states. The latter band is suppressed in case of core/shell quantum dots. Comparison with the nanocomposites based on amorphous polymer evidences higher PL quantum yield for LCP matrix.

Жидкокристаллические полимерные (ЖКП) нанокompозиты, содержащие квантовые точки (КТ), привлекают к себе большое внимание

благодаря возможности создания слоистой упорядоченной структуры с высокой концентрацией КТ. Наиболее ощутимым преимуществом использования подобных структур является возможность снизить негативное влияние Оже-рекомбинации, что позволит добиться усиления излучения в такой среде [1]. Другой особенностью таких наноконкомпозитов является возможность модифицировать зонную структуру КТ, менять упорядоченность КТ и свойства матриц приложением электрического поля или изменением температуры. В связи со всем выше перечисленным подобные наноструктуры оказываются перспективными в области создания устройств оптической генерации [2].

Нами изучались наноконкомпозиты на основе смектического (БК-6ПА) и близкого ему аморфного полимера (ПМБК-6А), содержащие КТ CdSe или CdSe/ZnS с различными массовыми долями от 1 до 60 %. Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) и их кинетики проводились при возбуждении образцов лазерными импульсами длительностью 25 пс на длине волны 532 нм. Были также измерены спектры возбуждения ФЛ.

Спектры ФЛ полимеров с КТ CdSe содержат две полосы (2,15 и 1,70 эВ), связанные с экситонами и дефектными состояниями соответственно; эффективность последней оказывается больше в ЖКП по сравнению с аморфными. Наличие оболочки КТ CdSe/ZnS в образцах с КТ существенно ослабляет полосу дефектных состояний. Сравнение спектров ФЛ и их кинетик в образцах смектических ЖКП и аморфных наноконкомпозитов свидетельствует о том, что время жизни ФЛ в ЖКП образцах в 2 раза выше, а сигнал ФЛ в 6 раз выше, чем в аморфных. Данные эффекты указывают на снижение эффективности безызлучательной рекомбинации в ЖКП наноконкомпозите. Таким образом показано, что использование ЖКП матриц позволяет увеличить квантовый выход ФЛ по сравнению с аморфным полимером.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00548.

Список литературы

1. Klimov V.I. // Los Alamos Science. 2003, V. 28, P. 214-220.
2. Герасин В.А. и др. // Успехи химии. 2013. V. 82(4). P. 303-332.
3. Hu L., et al. // Physical Chemistry. 2012. V. 116(20). P. 11283-11291.
4. Tselikov G., et al. // Chemphyschem. 2015. V. 16(5). P. 1071-1078.

А.И. МИСЬКЕВИЧ^{1,2}, А.В. ПОДКОПАЕВ^{2,3}¹Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»³Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Ar-Xe-C₂HBrClF₃ ПЛОТНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА 235

Приводятся результаты экспериментального изучения люминесценции плотной газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ (фторотан), возбуждаемой продуктами ядерной реакции ²³⁵U(n,f). Работа проводилась на импульсном ядерном реакторе БАРС-6. Длительность импульса нейтронов накачки 200 мкс, средняя энергия осколков деления 80 МэВ. Измерены спектры люминесценции в диапазоне длин волн 200-1100 нм с разрешением 0.5 нм. В спектрах зарегистрированы В-Х полосы эксимерных молекул XeCl* (308 нм), XeBr* (282 нм), XeF* (354 нм) и атомарные линии Ar и Xe. Измерены временные зависимости интенсивности люминесценции В-Х полос этих молекул.

А.И. МИС'КЕВИЧ^{1,2}, А.В. ПОДКОПАЕВ^{2,3}¹Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)³Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI

LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF HIGH DENSITY GAS MIXTURES Ar-Xe-C₂HBrClF₃ EXCITED BY PRODUCTS OF NUCLEAR REACTION 235U

The results of experimental investigation of high density gas mixtures Ar-Xe-C₂HBrClF₃ (halothane) luminescence excited by products of nuclear reaction ²³⁵U(n,f) are presented. We used the pulsed nuclear reactor BARS-6 in this work. Duration of neutron pumping flux was 240 μs, and average energy of fission fragments was 80 MeV. The luminescence spectrum was measured in 200 – 1100 nm wavelength area with 0.5 nm resolution. B-X transition bands of XeCl* (308 nm), XeBr* (282 nm), XeF* (354 nm) excimer molecules and Ar, Xe atomic lines are registered. The time resolved luminescence intensity of B-X transitions are measured.

В работе рассматривается использование химически малоактивного соединения C₂HBrClF₃(фторотан), ранее не применявшегося в качестве мультигалоидного донора, для получения эксимерных молекул XeBr*, XeCl* и XeF*. Фторотан не является токсичным веществом и

используется в медицинской практике как анестетик. Нами были проведены исследования излучательных характеристик плотных (~ 1 атм) газовых смесей Ar-Xe с добавками небольшого количества фторотана, при возбуждении продуктами нейтронной ядерной реакции деления $^{235}\text{U}(n,f)$ (удельный энерговыдел в газ ~ 5 мДж/см³, длительности нейтронного импульса накачки ~ 200 мкс). На рис. 1 приведена схема блока регистрации люминесценции газовых смесей, возбуждаемых продуктами ядерных нейтронных реакций. Полностью установка более подробно описана в [1].

В спектре люминесценции газовой смеси, вызванной возбуждением осколками деления (рис. 2), преобладает линия перехода В-Х молекулы XeCl^* , в то время как интенсивность линии В-Х XeBr^* заметно ниже. Кроме того, в спектре появляется линия, соответствующая переходу В-Х эксимерной молекулы XeF^* . Для изучения кинетики образования эксимерных молекул XeBr^* и XeCl^* при накачке осколками деления газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ были измерены временные зависимости интенсивности люминесценции В-Х и С-А полос этих молекул.

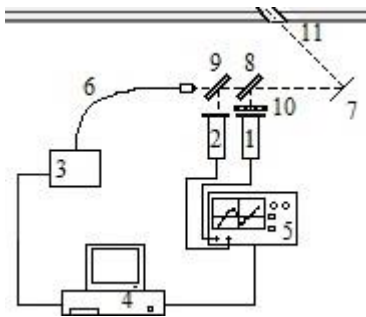


Рис. 1. Схема регистрации люминесценции

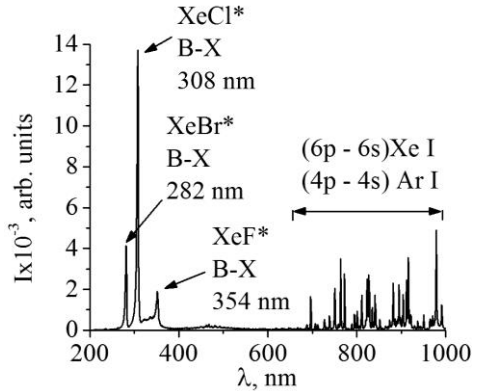


Рис. 2. Спектр люминесценции газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃

Список литературы

1. D'yachenko P.P., et. al. "Stand B" reactor-laser system // Atomic Energy. 2000. V. 88. No. 5. P. 352-357.

М.С. СМИРНОВ, О.В. БУГАНОВ¹, С.А. ТИХОМИРОВ¹,
О.В. ОВЧИННИКОВ, А.И. ЗВЯГИН, И.Г. ГРЕВЦЕВА

Воронежский государственный университет

¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ГИБРИДНЫХ АССОЦИАТАХ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdS

Методом фемтосекундной спектроскопии наведенного поглощения исследована динамика электронных возбуждений в гибридных ассоциатах коллоидных квантовых точек CdS и молекул метиленового голубого. Рассмотрен вклад в динамику распада экситона в квантовых точках процессов безызлучательного переноса возбуждения мономеров, димеров и гидролизированных радикалов красителя.

M.S. SMIRNOV, O.V. BUGANOV¹, S.A. TIKHOMIROV¹,
O.V. OVCHINNIKOV, A.I. ZVYAGIN, I.G. GREVCEVA

Voronezh State University

¹B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus, Minsk

FEMTOSECOND DYNAMICS OF ELECTRONIC EXCITATIONS IN HYBRID ASSOCIATES BASED ON CdS COLLOIDAL QUANTUM DOTS

The dynamics of electronic excitations in hybrid associates of colloidal quantum dots CdS and methylene blue molecules was studied by femtosecond spectroscopy of induced absorption. The contribution to the dynamics of exciton decay in quantum dots of nonradiative excitation transfer of monomers, dimers and hydrolyzed radicals of the dye is considered.

Исследование оптических свойств коллоидных квантовых точек (КТ) и наноструктур, сконструированных на их основе, является одним из актуальных направлений современной нанофотоники. Динамика электронных возбуждений в подобных структурах имеет принципиальное значение для понимания основных каналов их распада. Наносекундная кинетика люминесценции для коллоидных квантовых точек сульфидов металлов, находящихся в ассоциатах с молекулами красителей демонстрирует признаки для резонансного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения или переноса фотовозбужденных

носителей заряда между компонентами ассоциата. Однако сохраняется проблема выяснения роли конкурирующих каналов распада возбуждений, работающих с большей скоростью. В данной работе рассмотрена подобная проблема для ассоциатов коллоидных квантовых точек CdS, обладающих рекомбинационной люминесценцией в области 500-600 нм, и катионного красителя метиленового голубого (MB^+).

Динамику распада возбуждений исследовали методом фемтосекундной спектроскопии наведенного поглощения в видимой и ближней ИК области ("pump-probe" method) с временным разрешением 230 фс. Лазерная система действует по схеме задающий титан-сапфировый генератор – стретчер – усилитель – компрессор. Для возбуждения использовали вторую гармонику титан-сапфирового лазера. В качестве пробного луча использовали излучение фемтосекундного континуума, генерируемого первой гармоникой титан-сапфирового лазера в кювете с H_2O . Зондирование исследуемых объектов после возбуждения осуществляли в спектральном диапазоне 400-750 нм. Диапазон изменения задержек пробного луча составлял от 0.6 до 200 пс.

Исходно для исследуемых гибридных ассоциатов по стационарным спектрам оптического поглощения наблюдали, наряду с формированием ассоциатов $CdS-MB^+$ (λ_{max} - 660 нм) структур, содержащих димеры красителя $CdS-(MB^+)_2$ (λ_{max} - 600 нм), а также гидролизованый радикал $CdS-MBON^*$ (λ_{max} - 565 нм). Ассоциация с MB^+ в наносекундном диапазоне времен обнаруживает ускорение кинетики люминесценции излучательной рекомбинации, что является признаком безызлучательного резонансного переноса энергии с эффективностью 0.69.

В области около 410 нм также как и для случая чистых КТ CdS/TGA за несколько сотен фемтосекунд наблюдается наведённое отбеливание, которое исчезает. Одновременно с этим возникают новые полосы просветления в области 450-600 нм с максимумом при 565 нм, связанным с $MBON^*$, формирующимся при гибридной ассоциации. Эта полоса формируется постепенно, достигая максимума при 200 пс. Особенно примечательно, что полоса просветления, соответствующая мономерной и димерной формам красителя MB^+ в спектрах наведённого поглощения не проявляются, в отличие от чистых растворов MB^+ . Сделан вывод о том, что формирование ассоциатов типа $CdS-MBON^*$ определяет значительную деградацию в люминесцентных свойствах мономеров красителя, взаимодействующих с квантовыми точками.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№18-52-00037 Бел_а).

В.М. КОРШУНОВ^{1,2}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2},
И.В. ТАЙДАКОВ¹, Д.О. ГОРЯЧИЙ¹

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

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ФТОРИРОВАННОСТИ ЛИГАНДНОГО ОКРУЖЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ИОНА Eu(III)

Проведены спектроскопические исследования фото- и электролюминесценции четырех координационных соединений иона Eu(III) с органическими лигандами из класса β-дикетонатов. Исследованные структуры отличались числом атомов фтора (3-13), замещающих атомы водорода в лиганде. Установлено, что с увеличением числа атомов фтора квантовый выход фотолюминесценции увеличивается до 56 %. При дальнейшем увеличении фторированности наступает «насыщение» квантового выхода.

V.M. KORSHUNOV^{1,2}, S.A. AMBROZEVICH^{1,2},
I.V. TAIDAKOV¹, D.O. GORYACHIIY¹

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University

INFLUENCE OF FLUORINATION OF THE CARBON CHAIN IN LIGAND ENVIRONMENT ON LUMINESCENCE OF Eu(III) ORGANIC COMPOUNDS

Spectroscopic studies of the luminescence of four coordination compounds of the Eu (III) ion with β-diketonate ligand were carried out. The number of fluorine atoms in the main ligand was varied from 3 to 13. From spectroscopic studies of the synthesized complexes we conclude that increasing the degree of fluorination results in a significant rise in the quantum yield and sensitization efficiency.

Одним из перспективных классов химических веществ, обладающих высоким квантовым выходом люминесценции и узкополосным спектром излучения, являются металлоорганические комплексы ионов Eu(III) с лигандами на основе β-дикетонатов. Квантовый выход люминесценции таких комплексов определяется эффективностью передачи энергии электронного возбуждения с лигандов на центральный ион [1]. Ограничение квантового выхода определяется наличием механизмов безызлучательной релаксации электронного возбуждения в лиганде за

счет испускания фононов. В частности, замещение С-Н групп на С-F приводит к уменьшению энергии колебаний и, следовательно к уменьшению вероятности безызлучательной релаксации поскольку потребует испускания большего числа фононов [2, 3].

В настоящей работе были исследованы влияние количества замещенных фтором атомов водорода цепи основного лиганда на люминесцентные свойства координационных соединений иона Eu (III). Увеличение степени фторированности приводит к увеличению коэффициента экстинкции комплексов, при этом структура спектра оптического поглощения остается неизменной (рис. 1). Определены значения внутреннего и внешнего квантового выхода для гомологического ряда комплексов (четыре образца) с увеличивающейся степенью фторированности цепи лиганда L1. Значения внешнего квантового выхода при этом возрастали от 27 до 56 %.

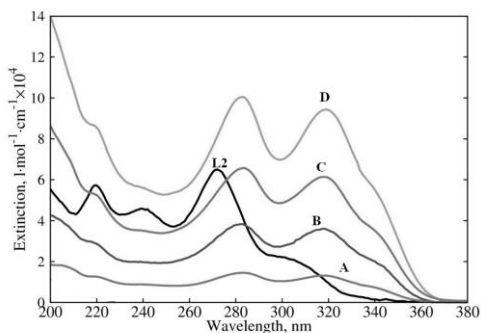


Рис. 1. Спектры оптического поглощения растворов комплексов А-Д и дополнительного лиганда L2

Синтетическая часть работы поддержана грантом РФФ №17-72-20088. Спектроскопические исследования были проведены при поддержке грантов РФФИ № 18-02-00653 и № 16-02-00594.

Список литературы

1. Weissman S.I. Intramolecular Energy Transfer The Fluorescence of Complexes of Europium // J.Chem. Phys. 1942. V. 10. No 4. P. 214-218.
2. Beeby A., Clarkson I., Dickins R., Faulkner S., Parker D., Royle L., de Sousa A., Williams J., Woods M. // J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1999. V. 2 (2). P. 493.
3. Varaksina E.A., Vitukhnovsky A.G., Datskevich N.P., Taidakov I.V., Ambrozovich S.A. Experimental Determination of Energy Transfer in Eu(III) Complexes Based on Pyrazole-Substituted 1, 3-Diketones // Journal of Russian Laser Research. 2015. V. 36 (6). P. 602-607.

А.И. ЗВЯГИН, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА, М.С. СМИРНОВ,
О.В. ОВЧИННИКОВ

Воронежский государственный университет

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АССОЦИАТОВ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ И МОЛЕКУЛ АЗУРА А

Исследованы нелинейно-оптические свойства гибридных ассоциатов коллоидных квантовых точек $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и молекул красителя Азур А под действием 10 нс лазерных импульсов на длине волны 532 нм (вторая гармоника Nd^{3+} :YAG-лазера). Обнаружено насыщение поглощения для гибридных ассоциатов, тогда как, для красителя характерно обратное насыщение поглощения, а коллоидные квантовые точки не демонстрируют нелинейно-оптический отклик.

A.I. ZVYAGIN, A.S. PEREPELITSA, M.S. SMIRNOV,
O.V. OVCHINNIKOV

Voronezh State University

NONLINEAR-OPTICAL PROPERTIES OF THE ASSOCIATES OF COLLOIDAL QUANTUM DOTS $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ AND MOLECULES AZURE A

The nonlinear optical properties of hybrid associates of colloidal $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ quantum dots and Azure A dye molecules under the action of 10 ns laser pulses at a wavelength of 532 nm (second harmonic of Nd^{3+} : YAG laser) were investigated. Saturation absorption was found for hybrid associates, whereas, dye is characterized by reverse saturation absorption, and colloid quantum dots do not exhibit a nonlinear-optical response.

В настоящее время большой практический интерес представляют гибридные системы, построенные на основе полупроводниковых коллоидных квантовых точек (КТ), сопряженных с молекулами органических красителей. Вероятно получение новых свойств гибридных наноструктур, обусловленных взаимодействием компонентов.

В данной работе анализируются нелинейно-оптические свойства ассоциатов КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и молекул тиазинового красителя Азур А (AzA), имеющего пик оптического поглощения (630 нм) вблизи длины волны пробных импульсов (532 нм). Для тиазиновых красителей известен

нелинейно-оптический отклик, зависящий от равновесия в системе “мономер – димер” [1].

Для исследований синтезированы КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$, пассивированные тиогликолевой кислотой и стабилизированные желатиной. Методика приготовления КТ и исследование структурных свойств описаны в [2]. КТ имеют максимум поглощения вблизи 3.6 эВ и средний размер порядка 1.9 нм. Гибридные ассоциаты приготавливали путем вливания в раствор с КТ при постоянном перемешивании водных растворов AzA. Образцами сравнения для приготовленных ассоциатов служили желатиновые растворы молекул AzA, присутствующие в том же количестве, что и в смеси с КТ. Спектры оптического поглощения, образцов сравнения демонстрируют преобладание мономерной формы красителя (630 нм), тогда как в присутствии КТ характерна димеризация AzA (580 нм). Ранее отмечалось, что димеризация тиазиновых красителей уменьшает уровень нелинейного поглощения исследуемого раствора [1].

Исследование нелинейных оптических свойств проводили с использованием стандартной методики Z-сканирования. Использовали вторую гармонику Nd^{3+} :YAG лазера (LS-2132UTF, LOTIS ТП) с $\lambda = 532$ нм, полученную в кристалле KDP. Импульсы имели длительность 10 нс при частоте повторения 1 Гц.

Образцы коллоидных КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ не испытывали нелинейно-оптического отклика. В случае энергий пробных импульсов (0.22 и 0.61 мДж) для гибридных ассоциатов заметно уменьшение обратного насыщенного поглощения, характерного для красителя AzA. Эффект проявлялся при приближении образца к фокальной плоскости линзы. Кроме этого, в случае гибридной ассоциации КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и AzA наблюдали увеличение насыщения поглощения, по сравнению с образцами AzA + желатина. Образцы не продемонстрировали рефракционного отклика.

Изменение характера нелинейного абсорбционного отклика отнесено к проявлению взаимодействия КТ $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ и AzA и обменом электронными возбуждениями между ними, реализуемым за счет фотопереноса неравновесных носителей заряда между компонентами гибридного ассоциата.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 18-32-00493 мол_а).

Список литературы

1. Ganeev R.A., Zvyagin A.I., et. al. // Dyes and Pigments. 2018. V. 149. P. 236-241.
2. Кондратенко Т.С., Гревцева И.Г. и др. // Оптика и спектр. 2018. Т. 124. № 5. С. 640-647.

О.И. СОКОЛОВСКАЯ, Н.Б. ТКАЧЕНКО

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА
НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ ФОТОНОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА
В СУСПЕНЗИИ**

С помощью численного моделирования и экспериментально исследована зависимость времени жизни фотонов и эффективности комбинационного рассеяния света (КРС) в суспензиях диметилсульфоксида (DMSO) от объемной доли рассеивателей (порошков рутила и фосфида галлия с частицами размером 0.5 мкм и 3 мкм соответственно). Измеренное время жизни фотонов в суспензиях методом оптического гетеродинамирования хорошо согласуется с теоретическими вычислениями. Показано, что в случае частиц рутила возможен рост эффективности КРС в несколько раз с увеличением объемной доли рассеивателей.

O.I. SOKOLOVSKAYA, N.B. TKACHENKO

Lomonosov Moscow State University

**EFFECT OF LIGHT ELASTIC SCATTERING
ON PHOTON LIFETIME AND RAMAN SCATTERING
EFFICIENCY IN SUSPENSION**

Using numerical simulation and experimentally the dependence of the photon lifetime and the efficiency of Raman scattering in dimethyl sulfoxide (DMSO) suspensions on the volume fraction of scatterers (rutile and gallium phosphide powders with particles of 0.5 μm and 3 μm , respectively) was investigated. The measured photon lifetime in suspensions by optical heterodyning is in good agreement with theoretical calculations. It is shown that in the case of rutile particles severalfold increase in Raman efficiency with the increase in scatterers volume fraction can be achieved.

Наличие в среде упруго рассеивающих неоднородностей может привести к увеличению эффективности оптических процессов [1, 2]. Представляет интерес вопрос о том, какова степень влияния некогерентных эффектов упругого рассеяния света на интенсивность оптического сигнала, вышедшего из случайно-неоднородной среды.

Методом оптического гетеродинамирования [3] при использовании излучения лазера на кристалле Sr: форстерита (1250 нм, 80 фс, 80 МГц) были измерены кросс-корреляционные функции импульсов, рассеянных

назад кюветами с суспензиями, и лазерных импульсов. Из этих данных были получены зависимости мощности отраженного от кюветы сигнала от времени (рис. 1а) и определены времена пребывания обратнорассеянных фотонов в суспензии. Данные результаты хорошо согласуются с результатами соответствующего моделирования методом Монте-Карло [4]. Измерение спектров КРС суспензии рутила в DMSO продемонстрировало возможность усиления сигнала КРС (рис. 1б), регистрируемого в геометрии «на отражение», в 3-4 раза, которое достигается на промежуточных значениях объемной доли рассеивателей (рис. 1в). Результаты моделирования находятся в качественном согласии с экспериментальными данными. Для суспензий фосфида галлия наблюдалось поглощение на рассеивателях, что привело к спаду эффективности КРС.

Таким образом, показана возможность управлять эффективностью КРС суспензии путем изменения рассеивающих свойств неоднородной среды.

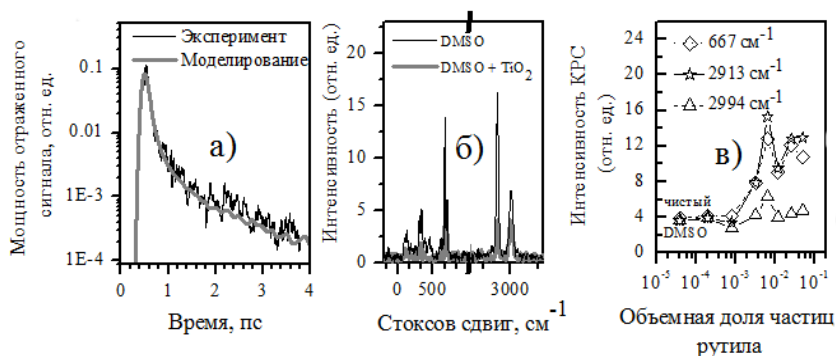


Рис. 1. Временная характеристика сигнала, отраженного суспензией фосфида галлия с объемной долей рассеивателей 0.121 (а); сравнение спектра КРС чистого DMSO и DMSO в составе суспензии с рутилом (б); зависимость интенсивности линий КРС DMSO от объемной доли порошка рутила в суспензии(в)

Список литературы

1. Mel'nikov V.A., Golovan L.A., Konorov S.O., et. al. // Appl. Phys. B. 2004. V. 79. № 2. P. 225-228.
2. Головань Л.А., Соколов А.А., Тимошенко В.Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. № 2. С. 891-896.
3. Бестемьянов К.П. и др. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 7. С. 666-668.
4. Hokr B.H., Yakovlev V.V. Raman signal enhancement via elastic light scattering // Optics express. 2013. V. 21. № 10. P. 11757.

Е.О. ЕПИФАНОВ, А.Г. ШУБНЫЙ, Н.В. МИНАЕВ

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

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО СО₂ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ В ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Демонстрируется одностадийный метод создания материалов с внедренными наночастицами (НЧ) серебра в среде сверхкритического СО₂ (скСО₂), а также установка для его реализации. Обсуждаются преимущества использования скСО₂ как транспортной среды для НЧ. Анализируются возможности данного подхода для создания различных нанокompозитных материалов и их применения.

E.O. EPIFANOV, A.G. SHUBNIY, N.V. MINAEV

Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and photonics» RAS, Troitsk

OBTAINING SILVER NANOPARTICLES BY METHOD OF LASER ABLATION IN SUPERCRITICAL CO₂ MEDIA AND ITS IMPLEMENTATION IN POROUS MATERIALS

A one-step method of creating materials with embedded silver NPs in scCO₂ media and an experimental setup for its realisation are demonstrated. The advantages of using scCO₂ as a transport media for NP are discussed. The possibilities of this approach for creating various nanocomposite materials and their application are analysed.

Известно, что среда сверхкритического СО₂ (скСО₂) обладает рядом уникальных свойств: настраиваемая в широком диапазоне плотность, высокая растворяющая способность для газов и многих веществ, крайне низкая вязкость, высокая диффузионная способность, отсутствие поверхностного натяжения [1].

Одним из перспективных новых методов введения наночастиц (НЧ) в пористые и полимерные материалы является метод сверхкритической флюидной (СКФ) импрегнации, в первую очередь, в среде скСО₂ [2].

Для проведения лазерной абляции в среде скСО₂ использовался модульный оптический реактор высокого давления.

В работе использовался лазер Lotis ТП LS-2138TF.

Для формирования в объеме реактора среды скСО₂ использовалась система терморегулирования реактора и насос высокого давления. Схема установки представлена на рис. 1.

Эксперименты проводились при трех различных плотностях среды скCO_2 : 0,2; 0,4; 0,8 г/см³. Фокусировка лазерного пучка осуществлялась линзой в подвижной оправке.

Для исследования поглощающих свойств получаемого коллоидного раствора НЧ серебра использовалась следующая схема: излучение дейтериевой лампы заводилось внутрь объема реактора и регистрировалось на выходе спектрометром Ocean optics QEPro.

Для насыщения НЧ серебра, образцы полимерных материалов на основе фторопласта крепились в объеме реактора на металлических держателях, закрепленных на разной высоте относительно мишени внутри реактора.

Полученные плёнки были проанализированы методом спектроскопии поглощения с помощью спектрометра Ocean optics QEPro. с целью регистрации наличия полос поглощения, относящихся к плазмонным полосам поглощения НЧ серебра и исследованы с использованием сканирующего электронного микроскопа (рис. 2).



Рис. 1. Схема установки

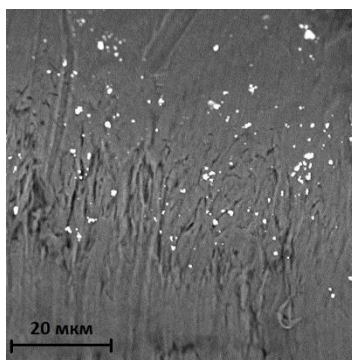


Рис. 2. Срез образца полимера с НЧ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований; гранты РФФИ 18-29-06032 и 18-29-06056.

Список литературы

1. Nicolais L.C.G. // Metal-Polymer Nanocomposites. John Wiley & Sons, 2004. V. 11.
2. Sanli D., Bozbag S.E., et. al. // Synthesis of nanostructured materials using supercritical CO_2 : Part I. Physical transformations // J. Mater. Sci. 2012. V. 47. № 7. P. 2995-3025.

А.К. ИВАНОВА^{1,2}, А.А. ИОНИН², С.И. КУДРЯШОВ²
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ФОРМИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЙ-ЗОЛОТО МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ

Экспериментально было изучено создание гибридных металл-диэлектрических наночастиц путем наносекундной лазерной абляции в деионизованной воде поверхность твердой мишени кремния, покрытой тонкой золотой пленкой. Исследованы физические (размер, форма, состав) и оптические свойства (пропускание, коэффициент экстинкции) и их зависимости от параметров лазерного воздействия.

A.K. IVANOVA^{1,2}, A.A. IONIN², S.I. KUDRYASHOV²
¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FORMATION OF HYBRID SILICON-GOLD NANOPARTICLES BY METHOD OF NANOSECOND LASER ABLATION IN LIQUID

The creation of hybrid metal-dielectric nanoparticles by nanosecond laser ablation in distilled water of the surface of a solid silicon target coated with a thin gold film was experimentally studied. The physical (size, shape, composition) and optical properties (transmission, extinction coefficient) and their dependence on the parameters of laser irradiation were examined.

Гибридные наночастицы «ядро-оболочка» представляют новый класс наноматериалов. Они сочетают свойства металлических наночастиц (резонансное рассеяние излучения в оптическом диапазоне и локальный плазмонный резонанс) и диэлектрических (высокое поглощение и направленность излучения). Эти уникальные свойства могут использоваться в спектроскопии для увеличения разрешения и чувствительности [1], в медицине для наблюдения и лечения зараженных клеток [2], в электронике для создания наноантенн [3]. Наночастицы можно получать различными способами. Метод лазерной абляции имеет ряд преимуществ.

В данной работе были получены гибридные наночастицы, состоящие из кремниевой сердцевинки и золотой оболочки, методом наносекундной лазерной абляции в деионизованной воде.

Мишень из кремния покрытая золотой пленкой (толщина ≈ 50 нм) методом магнетронного напыления подвергалась воздействию лазерного излучения с помощью лазерной системы НТФ MARK (Bulat) ($\lambda = 1064$ нм, $\tau = 120$ нс, E_{\max} в импульсе = 1 мДж), состоящей из волоконного иттербиевого лазера и сканирующей системы ($F = 160$ мм). Была исследована зависимость наработки НЧ при различных плотностях энергии и скорости сканирования лазера.

Зависимости коэффициента экстинкции от скорости сканирования при различных плотностях энергии обладают немонотонным характером, демонстрируя максимум в области $v = 150-200$ мм/с (рис. 2). Рост коэффициента экстинкции связан с увеличением массового выхода НЧ, однако наблюдаемая динамика его изменения противоречит полученным ранее данным, согласно которым массовый выход НЧ линейно растет с увеличением частоты следования импульсов.

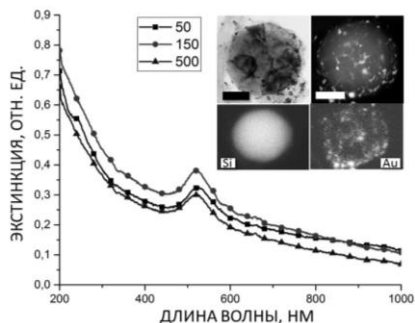


Рис. 1. Пропускание коллоидных растворов НЧ при различных скоростях сканирования, на вкладке изображение НЧ и их химический анализ

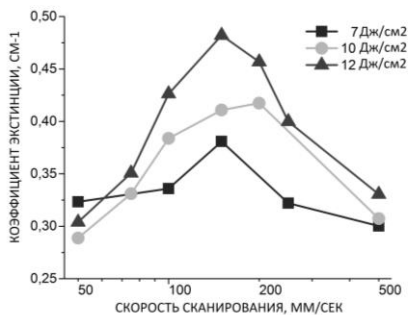


Рис. 2. Зависимость коэффициента экстинкции от скорости сканирования

Список литературы

1. Zograf G.P., Petrov M.I., et. al. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 929.
2. Monaco I., Arena F., et. al. // Bioconjugate Chem.. 2017. V. 28 (5). P. 1382-1390.
3. Chebykin A.V., Zalagina A.S., et. al. // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1874.

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

МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Описывается метод лазерно-индуцированного жидкостного микроstructuring оптических материалов с обратной стороны (Laser-Induced Backside Wet Etching-LIBWE), а также установка для его реализации. Анализируются возможности обработки твердых оптических материалов, в частности лейкосапфира, с использованием технологии термоплазмонного микроstructuring. Приводятся примеры создаваемых микроструктур и обсуждаются возможности их применения.

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

OPTICAL MATERIALS MICROSTRUCTURING BY WET LASER-INDUCED ETCHING

A method of laser-induced liquid microstructuring of optical materials on the backside (Laser-Induced Backside Wet Etching-LIBWE) and a compact setup for its realization are described. The possibilities of processing solid optical materials, in particular leucosapphire- Al_2O_3 , using thermoplasmonic microstructuring technology are analyzed. Examples of created microstructures are given and possibilities of their use are discussed.

Микроstructuring твердых оптических материалов, в частности сапфира, может применяться для создания подложек светоизлучающих элементов, при изготовлении антиотражающих покрытий для дальнего инфракрасного излучения, в микроэлектронике, фотонике и микрофлюидике [1]. Однако высокая твердость и химическая стойкость делают их обработку (механическую, ультразвуковую или химическую) непростой задачей.

Один из современных подходов к лазерному микроstructuring прозрачных материалов – лазерно-индуцированное жидкостное травление с обратной стороны (laser-induced backside wet etching – LIBWE) [2].

Процесс лазерно-индуцированного травления основан на механизме термоплазменного поглощения сфокусированного излучения на границе образец/жидкость с последующим образованием сверхкритической среды, которая вызывает локальное травление образца [3, 4]. Фотографии каналов, сформированных методом LIBWE с помощью F-theta объектива, их трехмерные изображения и поперечные профили представлены на рис. 1. Структуры более высокого разрешения, полученные с помощью микроскопического объектива (NA = 0,25), представлены на рис. 2.

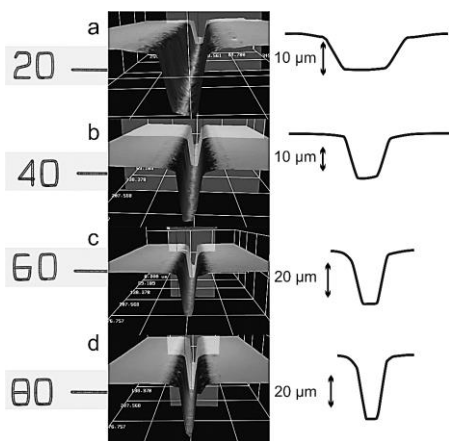


Рис. 1. Фотографии каналов, их трехмерные изображения и поперечные профили для различного количества проходов лазерного излучения: 20 (a), 40 (b), 60 (c), 80 (d)

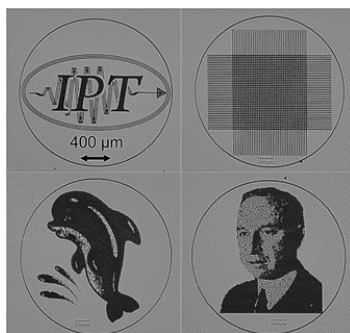


Рис. 2. Примеры полученных микроструктур на сапфировой подложке

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований, гранты РФФИ 18-29-06056 и 18-02-00420.

Список литературы

1. Теплова Т.Б., Самерханова А.С. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 10. С. 339.
2. Zimmer K., Ehrhardt M., et. al. // Singapore: Pan Stanford, 2012.
3. Tsvetkov M.Yu., Yusupov V.I., et. al. // Laser Physics Letters. 2016. V. 13. P.106001.
4. Цветков М.Ю., Минаев Н.В и др. // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2017. Т. 12. № 2. С. 68-80.

О.В. МКРТЫЧЕВ

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
филиал, Новороссийск, Краснодарский край*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С СИСТЕМОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СЛОЁВ С ПОМОЩЬЮ РЕКУРРЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия излучения с плоскопараллельными слоями. В ходе эксперимента определялись показатели преломления и толщины слоёв тонких плёнок из диоксидов кремния и титана, нанесённых на стеклянную подложку. Разработана система рекуррентных соотношений для определения оптических и геометрических параметров тонкоплёночных слоёв.

O.V. MKRTYCHEV

Belgorod V.G. Shukhov State Technology University, Novorossiisk Branch

STUDY OF INTERACTION OF RADIATION WITH A SYSTEM OF PLANE-PARALLEL LAYERS BY MEANS OF RECURRENT EQUATIONS

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the interaction of radiation with plane-parallel layers. In the course of the experiment, the refractive indices and thicknesses of layers of thin films of silicon dioxide and titanium deposited on a glass substrate were determined. A system of recurrence relations has been developed for determining the optical and geometrical parameters of thin-film layers.

Технологии тонкоплёночных покрытий являются одним из ведущих направлений нанофотоники и микроэлектроники. Взаимодействие излучения с веществом играет важную роль в таких технологиях и решение задач, встающих перед исследователями ведётся во многих направлениях [1-8]. Среди этих задач часто требуется определить оптические и геометрические характеристики покрытий [8, 9]. В работах [9-12] экспериментально и теоретически исследовались проблемы взаимодействия мощного импульсного излучения со стеклянными образцами, покрытыми наноразмерными плёнками. Анализ задачи [11-14] позволил разработать метод определения показателя преломления каждого слоя и его толщину по результатам фотометрических измерений. Были

исследованы образцы с различным составом и различным количеством плёнок [3-5]. Излучение лазера на длине волны 632 нм из источника излучения направлялось под некоторым углом на закреплённую мишень. После многократных отражений и преломлений в системе плоскопараллельных покрытий излучение попадало на поверхность фотодиодов, показания которых поступали для записи и обработки на компьютер. Угол падения менялся на установке от минимального значения в 25° до максимального значения в 80° . По результатам исследований были определены экспериментальные значения энергетических коэффициентов отражения, преломления и поглощения излучения с помощью составленной системы рекуррентных уравнений.

Список литературы

1. Досколович Л.Л., Моисеев М.А., Султанов А.Х. // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 4. С. 469.
2. Заричняк Ю.П., Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н. // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 12. С. 2318.
3. Borisov G.M., Gol'dort V.G., et. al. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. No. 2. P. 148.
4. Алтуний К.К. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16. № 1. С. 81.
5. Каленский А.В., Звекон А.А., Никитин А.П. // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83. № 6. С. 972.
6. Огородников И.Н., Яковлев В.Ю. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. № 1-3. С. 137.
7. Popov I.I., Vashurin N.S., et. al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2014. V. 78. No. 12. P. 1295.
8. Ржанов А.В. и др. / Труды II Всесоюзной конференции «Эллипсометрия – метод исследования физико-химических процессов на поверхности твёрдых тел», Новосибирск, 1981. Новосибирск: Наука, 1983.
9. Мкртычев О.В. // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 10-13.
10. Мкртычев О.В., Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2015. Вып. 1(213). С. 128-135.
11. Мкртычев О.В. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2012. № 4. С. 36-37.
12. Шеманин В.Г., Аткарская А.Б., Мкртычев О.В. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2014. Т. IV. № 3. С. 29-34.
13. Мкртычев О.В. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 6. С. 239-241.
14. Кадрик К.А., Мкртычев О.В. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 1. С. 238-242.

А.В. ПОПОВА, П.С. ГОНЧАРОВА, А.В. СЮЙ,
А.И. ЛИВАШВИЛИ, Н.М. КИРЕЕВА, Д.Е. САВИЧ,
В.В. КРИШТОП

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИНОК ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ В БЕЛОМ СВЕТЕ

Работа посвящена анализу спектра широкополосного оптического излучения, прошедшего через двухступенчатый фильтр Шольца. Рассматривается решение аддитивной задачи, определения геометрической толщины анизотропных кристаллов по характерным особенностям профиля спектра проходящего излучения.

A.V. POPOVA, P.S. GONCHAROVA, A.V. SYUY,
A.I. LIVASHVILI, N.M. KIREEVA, D.E. SAVICH, V.V. KRISHTOP
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF THICKNESS OF ANISOTROPIC PLATE BY INTERFERENCE-POLARIZATION METHOD

The paper is devoted to the analysis of the spectrum of broadband optical radiation transmitted through a two-stage Solc filter. The solution of the additive problem, the determination of the geometric thickness of anisotropic crystals from the characteristic features of the profile of the transmitted radiation spectrum is considered.

Тонкие анизотропные кристаллы обладают уникальным воздействием на поляризационные и спектральные характеристики проходящего оптического излучения [1]. Результаты таких физических взаимодействий находят научно-практическое применение в таких приложениях как оптический абсорбционный анализ, оптические широкоформатные интегрированные системы электрооптические модуляторы сигнала [2-4]. Размеры и химический состав полу- и четвертьволновых пластин, используемых для практических применений должны соблюдаться с высокой точностью [2]. Практически пластинки подобной толщины невероятно хрупки, поэтому рационально использовать конструкцию скрещенных анизотропных элементов, которая оказывает влияние своей

эффективной толщиной. Контроль геометрических размеров после шлифовки пластин с высокой точностью можно осуществлять несколькими способами [3].

Целью работы является экспериментальное исследование пространственных спектральных характеристик квазиестественного оптического излучения, прошедшего через двухступенчатый скрещенный фильтр Шольца. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, в которой сколлимированный пучок немонахроматического излучения от лампы накаливания проходил через поляризатор, расположенный под углом 45 градусов к оптическим осям кристаллов с длинами 1,8 мм. Анализ спектрального профиля прошедшего излучения показывает (рис. 2), что на одну интерференционную полосу тонкой разностной пластины приходится ≈ 13 интерференционных полос от кристалла. Измерив микрометром толщину одного кристалла, получили значение 1,8 мм. Из рассуждений, приведенных выше, можно сделать вывод, что разница толщин составит 0,130 мм. Подобный способ определения эффективной длины кристалла демонстрирует высокую точность при использовании спектрометров с высоким разрешением.

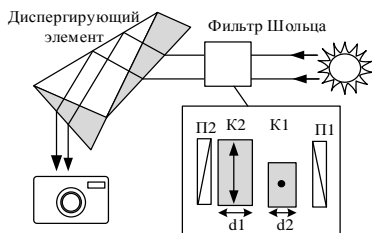


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

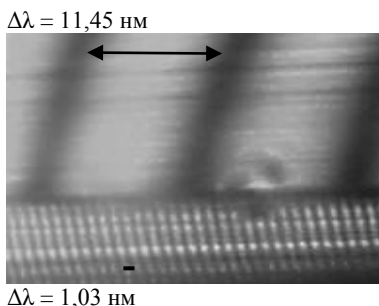


Рис. 2. Фотография распределения интенсивности излучения

Список литературы

1. Попова А.В., Гончарова П.С., Криштоп В.В. // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2017. Т. 2. С. 319-324.
2. Колесников С.А., Колесникова Е.С., Писаревский Ю.В., Турутин Ю.А. // Кристаллография. 2011. Т. 56. № 1. С. 56-60.
3. Агучин В.В., Хасанов Т. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. № 2. С.225-230.
4. Goncharova P.S., Syuy A.V., Krishtop V.V. // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10176. P. 101761G.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.И. КОЛЕСНИКОВ,
А.И. ИВАНОВА

Тверской государственной университет

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ И ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

Исследовано влияние нагрева полированных образцов германия на профиль поверхности и оптическое пропускание. Полученные профили анализировались с помощью программы, моделирующей прохождение электромагнитного излучения через материал. Сделаны выводы, что в рабочем диапазоне температур уменьшение коэффициента пропускания, в большей степени, связано с увеличением коэффициента отражения, вследствие изменения рельефа поверхности.

S.A. TRETIAKOV, I.A. KAPLUNOV, A.I. KOLESNIKOV,
A.I. IVANOVA

Tver State University

INFLUENCE HEATING ON THE PROFILE OF SURFACE AND THE OPTICAL TRANSMISSION OF SINGLE CRYSTALS OF GERMANIUM

The influence of the heating on the profile of surface of polished samples of germanium and on their optical transmission was studied. The obtained profiles were analyzed with a program that simulates the propagation of electromagnetic radiation through the material. It was concluded that in the operating temperature range the decrease of the coefficient of transmission is the most associated with an increase the coefficient of reflection due to a change of the surface.

Высокая механическая и эксплуатационная устойчивость, оптимальный набор физических и оптических характеристик кристаллического германия, обуславливают его широкое применение во многих инфракрасных (ИК) системах и технологиях [1].

Известно, что в кристаллах германия имеет место существенная зависимость оптического пропускания от температуры – уже при температурах 50-60 °С в рабочем диапазоне длин волн наблюдается снижение пропускания на несколько процентов [2]. Кроме того, нагрев

монокристаллов приводит к необратимому изменению параметров шероховатости поверхности и её оптических свойств [3].

Целями настоящей работы являлись анализ изменений профиля поверхностей германия при нагреве от 25 до 65 °С, расчет соответствующих коэффициентов пропускания и отражения света, а также проведение спектрометрических исследований при различных температурах.

Исследования рельефа поверхности при нагреве осуществлялось с помощью интерференционного профилометра NanoMap WLI1000. Полученные профили были проанализированы с помощью программного обеспечения, базирующегося на геометрооптическом приближении и моделирующим пропускание света через материал с неровной поверхностью. Модель показала увеличение коэффициента отражения на 1-3 % и, как следствие, уменьшение коэффициента пропускания, что соответствовало экспериментально полученным, с помощью фурье-спектрометра TENSOR-27, значениям (рис. 1).

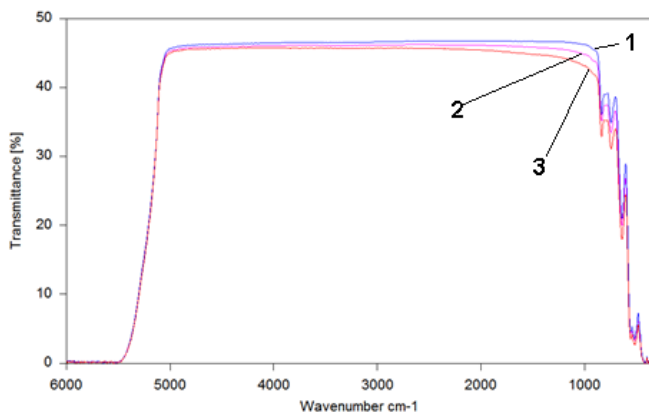


Рис. 1. Спектрограммы пропускания монокристаллов германия, соответствующие температурам: 1 - 25 °С, 2 - 45 °С, 3 - 65 °С

Список литературы

1. Claey's C.L., Simoen E. Germanium-based Technologies: From Materials to Devices. Berlin: Elsevier, 2007.
2. Kaplunov I.A., Smirnov Yu.M., et. al. // Journal of Advanced Materials. 2004. № 4. P. 35-40.
3. Третьяков С.А., Каплунов И.А. и др. //VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. 2017. С. 326-327.

Л.А. АЛЕШИНА, О.В. СИДОРОВА, А.В. КАДЕТОВА,
Н.В. СИДОРОВ¹, Н.А. ТЕПЛЯКОВА¹, М.Н. ПАЛАТНИКОВ¹

Петрозаводский государственный университет

*¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ОБУСЛОВЛЕННАЯ ДЕФЕКТАМИ СВЕРХСТРУКТУРА В НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Методами полнопрофильного рентгеновского анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света исследованы кристаллы LiNbO_3 . В рентгеновских и рамановских спектрах были обнаружены слабые «лишние» линии, которые являются результатом образования в кристаллической матрице упорядоченной сверхструктурной гексагональной подрешетки.

L.A. ALESHINA, O.V. SIDOROVA, A.V. KADETOVA,
N.V. SIDOROV¹, N.A. TEPLYAKOVA¹, M.N. PALATNIKOV¹

Petrozavodsk State University

*¹I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

THE SUPERSTRUCTURE CAUSED BY DEFECTS IN NONLINEAR OPTICAL LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

We have performed study of LiNbO_3 crystals using methods of full-profile X-ray analysis and Raman spectroscopy. Weak “extra” lines were founded in Raman scattering spectra and X-rays patterns. They were caused by a formation of an ordered superstructure of a hexagonal sublattice with defects in a crystal matrix.

Методами полнопрофильного рентгеновского анализа и спектроскопии КРС выполнены исследования легированных кристаллов ниобата лития: $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(0.062, 0.84, 2.19, 2.48, 2.66, 2.67 \text{ мол. \% Er}_2\text{O}_3)$, $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}(6.52 \text{ мол. \% ZnO})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Tb}(3.0 \text{ мол. \% Tb}_2\text{O}_3)$, выращенных из шихты различного генезиса, а также кристаллов LiNbO_3 конгруэнтного состава и близкого к стехиометрическому составу. На всех полученных рентгенограммах помимо основных отражений фазы LiNbO_3 наблюдаются дополнительные линии, запрещённые пространственной группой симметрии $R3c$ решётки с периодами $a = 5.1494 \text{ \AA}$; $c = 13.862 \text{ \AA}$. На рис. 1 в качестве примера приведена рентгенограмма кристалла

$\text{LiNbO}_3:\text{Er}(0.062\text{ мол. \% Er}_2\text{O}_3)$. Качественный фазовый анализ, выполненный на основе базы данных ICSD, показал, что «лишние» линии не являются отражениями второй фазы. Эти отражения были проиндексированы в гексагональной решетке с удвоенным периодом a элементарной ячейки, то есть в ячейке с в 4 раза большим объемом. Показано, что интенсивности и положения дополнительных отражений не зависят от вида и концентрации легирующего катиона. В спектрах КРС нестехиометрических кристаллов ниобата лития также наблюдаются малоинтенсивные «лишние» линии, не зависящие от состава кристалла. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что в нестехиометрических кристаллах ниобата лития формируется упорядоченная подрешетка, дающая свой вклад в спектр КРС и в рентгеновскую дифракционную картину в виде «лишних» (сверхструктурных) линий.

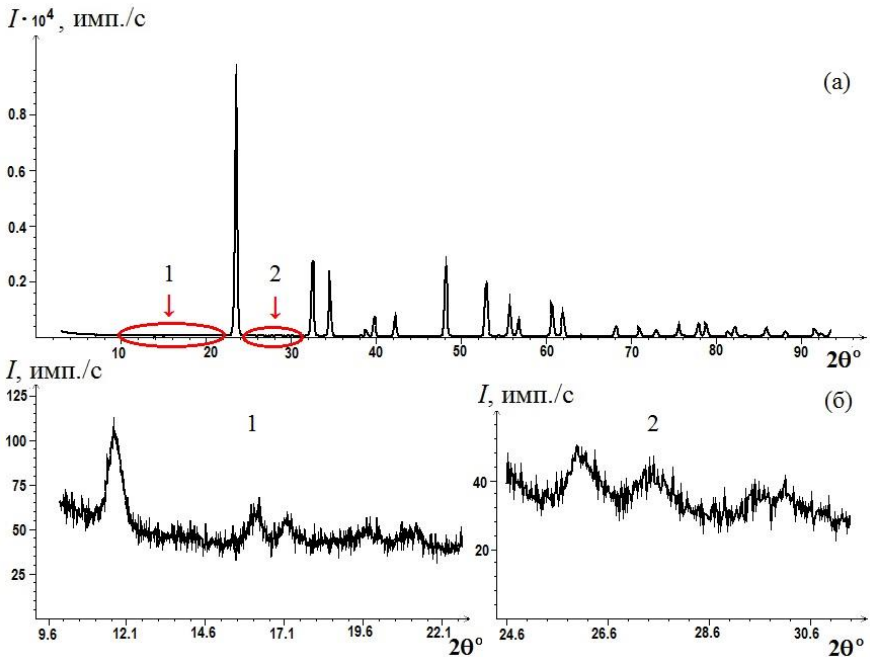


Рис. 1. Рентгенограмма кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Er}(0.062\text{ мол. \% Er}_2\text{O}_3)$, отмечены области дополнительных отражений (а); дополнительные слабые отражения в увеличенном масштабе (б)

Д.Е. АРТЕМОВ^{1,2}, А.В. ЩЕТИНИН², О.Е. НАНИЙ^{1,2},
В.Н. ТРЕЩИКОВ²

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

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ

В данной работе представлены результаты исследования влияния поляризации оптического излучения на эффективность электрооптической модуляции (ЭОМ) на X-срезе кристалла ниобата лития.

D.E. ARTEMOV^{1,2}, A.V. SCHETININ², O.E. NANIY^{1,2},
V.N. TRESHCHIKOV²

¹*Lomonosov Moscow State University*
²*T8 Ltd, Moscow*

EFFECT OF POLARIZATION OF AN OPTICAL CARRIER ON THE OPERATION OF AN MACH-ZEHNDER ELECTRO-OPTICAL MODULATOR ON LITHIUM NIOBATE

This paper presents the results of a study of the influence of polarization of optical radiation on the efficiency of electro-optical modulation (EOM) on an X-cut crystal of lithium niobate.

От поляризации оптического излучения, вводимого в электрооптический модулятор Маха-Цендера на ниобате лития, зависят: величина оптических потерь, полуволновое напряжение, частотный отклик модулятора, - основные показатели эффективности его работы. Максимальная эффективность ЭОМ при фиксированных прочих параметрах достигается в том случае, когда вводимое в ЭОМ оптическое излучение линейно поляризовано. Поэтому контроль поляризации оптической несущей – актуальная задача, требующая прецизионного решения при разработке промышленных электрооптических модуляторов.

В промышленных электрооптических модуляторах подобный контроль осуществляется несколькими методами: подавлением одной из фундаментальных мод; перекачкой энергии одной из фундаментальных мод в другую [1, 2]; параллельной независимой модуляцией обеих мод [3].

Однако и эти методы не позволяют полностью избавиться от паразитной моды. Поэтому практически важно определить зависимость допустимых отклонений поляризации оптической несущей от требований, предъявляемых к устройству.

В ходе эксперимента измерена зависимость интенсивности оптического излучения на выходе модулятора на X -срезе кристалла ниобата лития от приложенного постоянного напряжения (рис. 1). Как следует из графика, экспериментальная кривая имеет меняющиеся положение и амплитуду минимумов и максимумов, нежели предсказываемая теорией функциональная зависимость в случае работы модулятора в режиме “Push-Pull” $I(V) = I_0 \cdot \cos^2(kV)$, где I_0 – постоянная амплитуда, k – константа, V – приложенное напряжение.

Анализ приведённой зависимости позволяет определить полуволновые напряжения, характерные двум ортогональным модам – ТЕ, которая в данном случае параллельна горизонтальной оси Z , и ТМ, которая в данном случае параллельна вертикальной оси X .

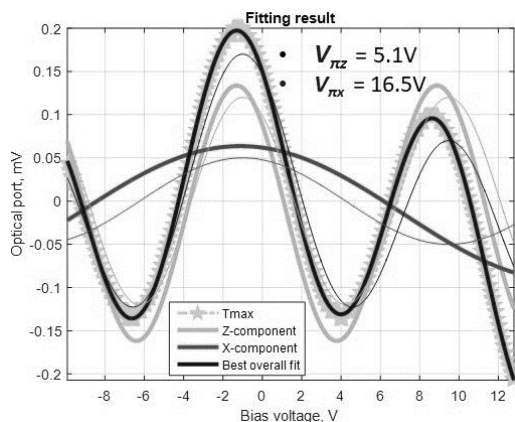


Рис. 1. Зависимость интенсивности оптического излучения на выходе модулятора от приложенного постоянного напряжения

Список литературы

1. Ping Y., Eknayan O., Taylor H.F. Electro-optic polarization converter with programmable spectral output in lithium niobate // Opt. Commun. 2007. Т. 278. № 2. С. 307-311.
2. Sung W.J. Investigation of a polarization controller in titanium diffused lithium niobate waveguide near 1530nm wavelength // 2013.
3. Hsu C.W. и др. Lithium niobate polarization-independent modulator using integrated polarization splitters and mode converters // J. Light. Technol. 2017. Т. 35. № 9. С. 1663-1669.

А.Д. МОЛЧАНОВА¹, Н.Н. КУЗЬМИН^{1,2}, К.Н. БОЛДЫРЕВ¹

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТАБОРАТА МЕДИ CuB_2O_4 В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГЕОМЕТРИИ ФАРАДЕЯ

В работе представлены результаты исследований спектров поглощения и линейного дихроизма метабората меди CuB_2O_4 . Измерения проводились во внешнем магнитном поле геометрии Фарадея с шагом изменения величины магнитного поля около сотых долей Тесла. Полученные результаты необходимы для более детального построения и уточнения фазовой В-Т диаграммы метабората меди.

A.D. MOLCHANOVA¹, N.N. KUZMIN^{1,2}, K.N. BOLDYREV¹

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*Lomonosov Moscow State University*

INVESTIGATION OF THE ABSORPTION SPECTRA OF COPPER METABORATE CuB_2O_4 IN MAGNETIC FIELDS OF FARADAY GEOMETRY

The paper presents results of the studies of the absorption spectra and linear dichroism of copper metaborate CuB_2O_4 . Measurements were carried out in the external magnetic field of Faraday geometry with the step of changing the value of the magnetic field about hundredths of Tesla. The results obtained are necessary for more detailed construction and refinement of the phase B-T diagram of copper metaborate.

Метаборат меди CuB_2O_4 имеет специфическую кристаллическую структуру для безводных боратов двухвалентных элементов (бор скоординирован исключительно тетраэдрически) и обладает тетрагональной нецентросимметричной пространственной группой $I 2d$ [1]. Следует отметить, что в этой кристаллической структуре ионы Cu^{2+} расположены в двух неэквивалентных кристаллографических позициях ($4b$ и $8d$) с симметрией S_4 и C_2 [1], что приводит к наличию различных интересных физических свойств.

Магнитная структура метабората меди обладает «сильной» и «слабой» магнитными подсистемами. «Сильная» магнитная подсистема представлена ионами Cu^{2+} в позиции $4b$. Эта подсистема при $T_N = 21$ К

антиферромагнитно упорядочивается в легкоплоскостную структуру (лёгкая плоскость (ab)) [2, 3]. «Слабая» магнитная подсистема представлена ионами Cu^{2+} в позиции $8d$. По результатам нейтронных исследований было показано, что данная структура является квазиодномерной [3, 4]. Интересно, что при температуре ниже T_N магнитный момент Cu ($4b$) продолжает расти и при 12 К достигает значения $0,86 \mu\text{B}$ (μB – магнетон Бора). Ионы Cu ($8d$) при тех же параметрах имеют небольшой магнитный момент вдоль оси z , а его значение равняется $0,20 \mu\text{B}$ (он начинает расти ниже фазового перехода при 8 К, где метаборат меди переходит в несоизмеримую геликоидальную фазу).

В работе [5] было выявлено магнитное Давыдовское расщепление экситонов меди, а также был зарегистрирован линейный антиферромагнитный дихроизм в изотропной (ab) плоскости. По полученным прецизионным данным были зафиксированы новые фазовые переходы при температурах 7.9 и 8.5 К.

Представленная работа содержит результаты исследований спектров пропускания в области первой бесфононной линии CuV_2O_4 . Измерения проводились во внешнем магнитном поле геометрии Фарадея ($\mathbf{B}_{\text{ext}} \parallel \mathbf{k}$) в диапазоне 0-0.5 Тл. Проведенные измерения свидетельствуют об изменении характера дихроизма при магнитных фазовых переходах (зависимость сигнала линейного антиферромагнитного дихроизма от величины магнитного поля, смена знака дихроизма при различных магнитных фазовых переходах). Также проведены исследования на предмет асимметрии интенсивности поглощения в зависимости от направления внешнего магнитного поля (т.н. «невозвратности»), выявлены особенности при магнитных фазовых переходах. Эти исследования позволили нам построить уточненную фазовую В-Т диаграмму метабората меди.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00763 мол_а.

Список литературы

1. Martinez-Ripoll M., Martínez-Carrera S., García-Blanco S. // Acta Crystallographica Section B. 1971. V. 27 (3). P. 677-681.
2. Petrakovskii G., Velikanov D., Vorotinov A., Balaev A., Sablina K., Amato A., Roessli B., Schefer J., Staub U. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 205. P. 105.
3. Boehm M., Roessli B., Schefer J., Wills A., Ouladdiaf B., Lelievre-Berna E., Staub U., Petrakovskii G. // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 024405.
4. Martynov S., Petrakovskii G., Roessli B. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 269. P. 106.
5. Boldyrev K.N., Pisarev R.V., Bezmaternykh L.N., Popova M.N. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 247210.

П.В. ДОЛГАНОВ¹, К.Д. БАКЛАНОВА^{1,2}, В.К. ДОЛГАНОВ¹

¹*Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Приводятся результаты исследований оптических свойств жидкокристаллических фотонных кристаллов. Проведены комплексные спектральные измерения, экспериментальные результаты сопоставлены с теорией. Плотность фотонных состояний жидкокристаллических фотонных кристаллов определена из измерений поляризованной люминесценции.

P.V. DOLGANOV¹, K.D. BAKLANOVA^{1,2}, V.K. DOLGANOV¹

¹*Institute of Solid State Physics of the RAS, Chernogolovka*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF ONE-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL LIQUID-CRYSTALLINE PHOTONIC CRYSTALS

Results of investigations of optical properties of liquid-crystalline photonic crystals are given. Complex spectral measurements were performed; the experimental results are compared with theory. Photonic density of states in liquid-crystalline photonic crystals was determined from polarized fluorescence measurements.

Жидкие кристаллы, состоящие из ориентационно упорядоченных анизотропных молекул, образуют ряд фотонно-кристаллических структур. Примером одномерного фотонного кристалла может служить холестерический жидкий кристалл со спиральным упорядочением. Жидкие кристаллы также образуют фотонные кристаллы с трехмерным упорядочением, так называемые Голубые фазы. Благодаря спиральной структуре для жидкокристаллических фотонных кристаллов характерна сильная зависимость оптических свойств от поляризации световой волны. Плотность фотонных состояний является одной из важнейших характеристик фотонных структур, определяющей их основные оптические свойства. Экспериментальное определение плотности фотонных состояний представляет собой важную задачу как с точки

зрения фундаментальных свойств фотонных кристаллов, так и для практических приложений.

В работе выполнены комплексные исследования оптических свойств одномерных и трехмерных фотонных кристаллов с различным спектральным положением фотонной запрещённой зоны и величиной оптической анизотропии. На образцах высокого совершенства проведены измерения спектров пропускания, отражения, люминесценции, вращения плоскости поляризации света. Для определения плотности состояний использован метод, основанный на измерениях спектров поляризованной люминесценции красителей, растворённых в жидком кристалле [1, 2]. Плотность состояний определена с учётом поляризационных свойств собственных световых мод в жидкокристаллической структуре [3]. Параметры жидкого кристалла, использованные для определения плотности состояний, найдены из независимых измерений спектров пропускания и отражения. Результаты сопоставлены с теорией и с данными, полученными с помощью разработанного нами метода определения плотности состояний из измерений вращения плоскости поляризации света [4].

Периодическая структура и наличие фотонной зоны существенно модифицирует оптические свойства жидких кристаллов. В спектральной области фотонной зоны плотность состояний существенно уменьшается по сравнению со структурой без фотонной запрещённой зоны. Вблизи границ зоны плотность фотонных состояний имеет резкие максимумы. Проанализирована зависимость спектров люминесценции от ориентационного параметра порядка жидкого кристалла. Сопоставлены результаты измерений на фотонных кристаллах с одномерным и трехмерным упорядочением. Наблюдается существенная трансформация спектров люминесценции и плотности фотонных состояний при изменении температуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-02-00246.

Список литературы

1. Dolganov P.V. // JETP Lett. 2017. V. 105. P. 657.
2. Dolganov P.V., Dolganov V.K. // JETP Lett. 2018. V. 108. P. 170.
3. Schmidtke J., Stille W. // Eur. Phys. J. B. 2003. V. 31. P. 179.
4. Dolganov P.V. // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. P. 042509.

В.И. МАЩЕНКО¹, Н.Н. СИТНИКОВ^{2,3}, М.В. ЕРМАКОВА¹,
И.А. ХАБИБУЛЛИНА², А.В. ШЕЛЯКОВ³, В.В. БЕЛЯЕВ¹

¹Московский государственный областной университет, Москва

²Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ БОРОСИЛОКСАНОВЫХ ГЕЛЕЙ

Приведены результаты экспериментов по формированию микроструктур жидкого кристалла 4-циано-4-октилосидифенила (8ОСВ) в различных фазовых состояниях в матрицах на основе боросилоксановых гелей с различной геометрией ЖК-фазы (микрокапли, микроцилиндры и др.), в которых сохранилась жидкокристаллическое упорядочение. Показано, что в зависимости от температурных режимов ориентирования и термофиксации композитов могут быть получены различные микроструктуры жидких кристаллов в боросилоксановых матрицах с размерами от долей до десятков микрон.

V.I. MASHCHENKO¹, N.N. SITNIKOV^{2,3}, M.V. ERMAKOVA¹,
I.A. KHABIBULLINA², A.V. SHELYAKOV³, V.V. BELYAEV¹

¹Moscow Region State University, Moscow

²Keldysh Research Center, Moscow

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LIQUID-CRYSTAL COMPOSITES BASED ON BOROSILOXANE GELS

The results of experiments on the formation of microstructures of liquid crystal of 4-cyano-4-octoxydiphenyl (8OCB) in different phase states in matrices based on borosiloxane gels (microdrops, microcylinders, etc.), in which liquid crystal ordering was maintained, are presented. It is shown that, depending on the temperature regimes of orientation and heat-setting of the composites, various microstructures of the liquid crystal phase in borosiloxane matrices with sizes from share of micron to tens microns can be obtained.

Масштабные исследования функциональных композитных материалов на основе жидких кристаллов проводятся во всем мире [1]. Жидкокристаллические композиты представляют собой носители различной природы (как правило, полимеры), в которые введены жидкие кристаллы (ЖК) в виде отдельной фазы.

В предыдущих работах [2, 3] был представлен способ придания различных микроструктур нематическому ЖК в боросилоксане (БС). Благодаря уникальным неньютоновским свойствам БС – упругость при приложении механического напряжения и текучесть при отсутствии нагрузки – удалось микроструктурировать ЖК в боросилоксановых матрицах с получением микроструктур различной геометрии (капель, цилиндров и др.), в которых сохранялось нематическое упорядочение.

Целью данной работы является микроструктурирование ЖК 4-циано-4-октилосидифенила (8ОСВ) в различных фазовых состояниях в матрицах на основе боросилоксановых гелей (БС-гелей).

В работе получены новые ЖК-композиты на основе БС-гелей и 8ОСВ. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии и поляризационной-оптической микроскопии показано, что ЖК существует в композитах в виде отдельной фазы, и температуры фазовых переходов практически не отличаются от ЖК в свободном состоянии. Методом поляризационной-оптической микроскопии исследована микроструктура одноосно вытянутых композитов. Показано, что в зависимости от температурных режимов ориентирования и термофиксации композитов могут быть получены различные микроструктуры ЖК-фазы в боросилоксановых матрицах с размерами от долей до десятков микрон. Результаты данного исследования могут найти применение при разработке новых материалов для дисплейной техники и оптоэлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-18095\18 (мк).

Список литературы

1. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
2. Мащенко В.И., Соломатин А.С., Шашкова Ю.О., Беляев В.В. Микроструктура жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана. Оптические свойства дисперсной жидкокристаллической структуры на их основе // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: физика-математика. 2017. № 3. С. 97-107.
3. Мащенко В.И., Шашкова Ю.О., Соломатин А.С., Беляев В.В. // Особенности формирования микроструктуры жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: физика-математика. 2017. № 2. С. 34-45.

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОТОДЕГРАДАЦИИ
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
ОРГАНИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ
СО-КРИСТАЛЛОВ АМИНОПИРИДИН-НИТРОФЕНОЛ**

Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния процессов фотодеградациии на интенсивность генерации второй оптической гармоники новых нелинейно-оптических органических со-кристаллов 4-нитрофенола с производными аминопиридинового ряда: 2-аминопиридин; 4-аминопиридин; 2,6-диаминопиридин. Для исследуемых со-кристаллов представлены диаграммы направленности до и после процессов фотовоздействия.

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

**INVESTIGATION OF INFLUENCE OF PHOTOBLEACHING
ON INTENSITY OF SHG OF ORGANIC NONLINEAR OPTIC
CO-CRYSTALS AMINOPYRIDINE-NITROPHENOL**

Results of investigation of new organic nonlinear optic co-crystals 4-nitrophenol with conformations of aminopyridines (2-aminopyridine, 4-aminopyridine, 2,6-diaminopyridine) are presented. We represented the directional characteristics of organic co-crystals before and after photobleaching.

Создание и разработка устройств нелинейной оптики и фотоники напрямую связано с развитием элементной базы для данных областей. В настоящее время для создания оптических приборов и комплексов (преобразователи частоты излучения, генераторы терагерцового излучения, оптические модуляторы и волноводы) широко применяются неорганические нелинейно-оптические материалы: КТР, КДР, ЛВО, ВВО и др. Однако постоянное усложнение и миниатюризация нелинейно-оптических устройств подталкивает к созданию большого разнообразия органических нелинейно-оптических материалов, среди которых наиболее выделяются кристаллы MNA, POM и DAST.

В настоящей работе рассматриваются органические нелинейно-оптические со-кристаллы на базе аминопиридинового ряда, ранние исследования которых показали наличие достаточно высоких нелинейно-

оптических коэффициентов при отсутствии деградации под воздействием мощного лазерного излучения [1]. Также, для данных материалов были проведены измерения рефрактометрических параметров [2], результаты которых показывают значительную анизотропию показателей преломления между кристаллографическими осями, что, в свою очередь, подводит к исследованиям, представленным в работах [3, 4], которые показывают перспективность использования данных материалов в терагерцовой области излучения.

Целью данной работы является исследование стабильности оптических характеристик со-кристаллов аминопиридинового ряда под действием оптического излучения путем анализа интенсивностей второй гармоники до и после процессов фотодеградации. В работе исследованы следующие органические нелинейно-оптические со-кристаллы: 2-аминопиридин-4-нитрофенол (2AP4N); 4-аминопиридин-4-нитрофенол (4AP4N); 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол (2,6DAP4N). Фотообесцвечивание проводилось с помощью УФ-светодиода со следующими параметрами: длина волны 405 нм; мощность излучения 1 Вт; сила света 150 мКд. В процессе фотообесцвечивания четко наблюдается контраст засвеченной и незасвеченной областей, что говорит о наличии структурных изменений в объеме кристалла (рис. 1).

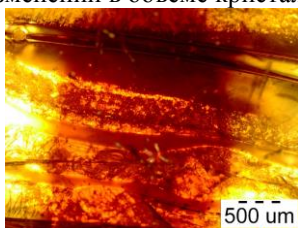


Рис. 1. Микрофотография со-кристалла 2,6DAP4N после фотообесцвечивания

Список литературы

1. Pavlovec I.M., Draguta S., Fokina M.I., Timofeeva T.V., Denisyuk I.Yu. Synthesis, crystal growth, thermal and spectroscopic studies of acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol // Optics Communications. 2016. P. 64-68.
2. Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Denisyuk I.Yu. Refractometric Parameters of Nonlinear Optical Molecular Cocrystals Based on the Aminopyridine Series // Optics and spectroscopy. 2018. V. 124. No. 2. P. 227-229.
3. Krishnakumara V., Rajaboopathi M., Nagalakshmi R. Studies on vibrational, dielectric, mechanical and thermal properties of organic nonlinear optical co-crystal: 2,6-diaminopyridinium-4-nitrophenolate-4-nitrophenol // Physica B. 2012. V. 407. P. 1119-1123.
4. Draguta S., Fonari M.S., Masunov A.E., Zazueta J., Sullivan S., Antipin M.Yu., Timofeeva T.V. New acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol // CrystEngComm. 2013. V. 15. P. 4700-4710.

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М. САГИТОВА,
Д.В. СИНИЦЫН, В.В. БАДИКОВ¹, Д.В. БАДИКОВ¹

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
¹Кубанский государственный университет, Краснодар

**СО-ЛАЗЕР С МНОГОКАСКАДНЫМ
ВНУТРИ- И ВНЕРЕЗОНАТОРНЫМ ШИРОКОПОЛОСНЫМ
ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ В КРИСТАЛЛАХ
BaGa₂GeSe₆ (1,7-6,0 мкм)**

Проведены эксперименты по широкополосной многокаскадной генерации излучения суммарных частот с использованием щелевого СО-лазера с ВЧ-возбуждением, работающего в режиме модуляции добротности резонатора, в двух кристаллах BaGa₂GeSe₆, что привело к многочастотной генерации в спектральном диапазоне 1,7-6,0 мкм. Пиковые мощности излучения основной полосы СО-лазера, и в области его второй и третьей гармоник составляли до 4,7 кВт, 100 Вт и 15 Вт соответственно.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV,
A.A. KOTKOV, A.Yu. KOZLOV, A.M. SAGITOVA,
D.V. SINITSYN, V.V. BADIKOV¹, D.V. BADIKOV¹

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow
¹Kuban State University, Krasnodar

**CO LASER WITH MULTI-STAGE INTRA- AND EXTRACAVITY
BROADBAND SUM FREQUENCY GENERATION
IN BaGa₂GeSe₆ CRYSTALS (1.7-6.0 μm)**

Broadband sum frequency multi-stage generation of Q-switched slab RF discharge CO laser was performed in two BaGa₂GeSe₆ crystals which resulted in multi-line generation within 1.7-6.0 μm spectral range. Peak powers of fundamental CO laser radiation, its second and third harmonics were up to 4.7 kW, 100 W and 15 W, respectively.

В работе [1] сообщалось о разработке компактного импульсно-периодического криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ-возбуждением, работающего в режиме модуляции добротности резонатора (МДР). Лазер одновременно излучал около сотни спектральных линий основных колебательно-вращательных полос молекулы СО в диапазоне длин волн

5-7 мкм. Лазерные импульсы, повторяющиеся с частотой 100 Гц, имели длительность несколько микросекунд при пиковой мощности 2 кВт и использовались для широкополосной генерации суммарной частоты в кристалле ZnGeP_2 с эффективностью до $\sim 8\%$ [2]. На базе данного лазера также была создана компактная импульсная широкополосная СО-лазерная система с внутривибраторным преобразованием частоты, для которой использовался нелинейный кристалл $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (BGGSe) в качестве выходного зеркала [3]. Эта лазерная система работала одновременно в двух спектральных диапазонах: основная полоса СО-лазера (4,9-6,0 мкм) и полоса ее суммарных частот (2,45-2,95 мкм).

В настоящей работе проводилось исследование широкополосной лазерной системы с МДР на основе многочастотного СО-лазера с ВЧ-накачкой при внутривибраторном преобразовании частоты его излучения в нелинейном кристалле BGGSe и её применения для генерации излучения в области третьей гармоники СО-лазера. Данный тип преобразования осуществлялся внрезонаторным способом во втором кристалле BGGSe путем суммирования основных частот излучения СО-лазера с его суммарными частотами, полученными внутривибраторным путем. Расчетный спектральный диапазон в области третьей гармоники лазера, который содержит линии поглощения первого обертона связи С-Н различных молекул, составил 1,6-1,9 мкм. Пиковая мощность излучения компактной импульсной широкополосной СО-лазерной системы с внутривибраторным преобразованием частоты была увеличена посредством его многопараметрической оптимизации до 4,7 кВт. Пиковая мощность излучения суммарной частоты СО-лазера достигала 100 Вт, что было на порядок выше полученных нами ранее значений [3]. С помощью генерации в области третьей гармоники спектр излучения лазерной системы было расширен до ближнего ИК диапазона. Спектр этого излучения в зависимости от угла падения на второй кристалл BGGSe варьировался в диапазоне 1,7-1,9 мкм с шириной 0,05 мкм. Максимальная мощность составила 0,5 Вт при КПД преобразования около 0,013 %. Таким образом, гибридная СО лазерная система может действовать в спектральном диапазоне 1,7-6,0 мкм.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10619).

Список литературы

1. Ionin A.A., Kochetkov Yu.V., Kozlov A.Yu., et. al. // Laser Physics Lett. 2017. V. 14. P. 055001.
2. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et. al. // Laser Physics. 2018. V. 28. P. 025401.
3. Ionin A.A., Badikov D.V., Badikov V.V., et. al. // Opt. Lett. 2018. V. 43. P. 4358.

К.Б. ИЛЬИНА^{1,2}, А.С. БОЙКОВА^{1,2}, М.А. МАРЧЕНКОВА^{1,2},
П.В. КОНАРЕВ^{1,2}, Ю.А. ДЬЯКОВА^{2,1}, Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ^{1,2},
М.В. КОВАЛЬЧУК^{2,1}

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

ВЛИЯНИЯ ЗАМЕНЫ РАСТВОРИТЕЛЯ – H₂O НА D₂O – НА ОБРАЗОВАНИЕ ОЛИГОМЕРОВ В РАСТВОРЕ ЛИЗОЦИМА ПРИ РОСТЕ КРИСТАЛЛОВ ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ СИНГОНИИ

Проведено исследование влияния дейтерированной (D₂O) и протонированной (H₂O) воды на образование олигомеров в растворе лизоцима при росте кристаллов тетрагональной сингонии методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). Показано образование димеров и октамеров в кристаллизационных растворах лизоцима в зависимости от температуры.

K.B. ILINA^{1,2}, A.S. BOIKOVA^{1,2}, M.A. MARCHENKOVA^{1,2},
P.V. KONAREV^{1,2}, Yu.A. DYAKOVA^{2,1}, Yu.V. PISAREVSKIY^{1,2},
M.V. KOVALCHUK^{2,1}

¹*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow*

²*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow*

THE INFLUENCE OF SOLVENT REPLACEMENT (FROM H₂O TO D₂O) ON THE FORMATION OF OLIGOMERS IN LYSOZYME SOLUTION UNDER GROWTH TETRAGONAL CRYSTALS

The effect of deuterated (D₂O) and protonated (H₂O) water on the formation of oligomers in a lysozyme solution during the growth of tetragonal crystal was studied using the small-angle X-ray scattering (SAXS) method. The formation of dimers and octamers in crystallization solutions of lysozyme is shown depending on temperature.

Изучена структура растворов лизоцима в H₂O и D₂O при росте кристаллов тетрагональной сингонии методом МУРР. Показано, что в растворе D₂O и H₂O, образуются димеры и октамеры, соответствующие

структуре будущего кристалла. Тетрамеры, гексамеры и олигомеры более высокого порядка не были обнаружены ни при каких условиях. Концентрация октамеров увеличивается с ростом концентрации белка и понижением температуры как в случае с H_2O , так и с D_2O [1-3]. При этом наблюдается, что при одинаковых условиях процентное содержание октамеров значительно выше в D_2O (рис. 1).

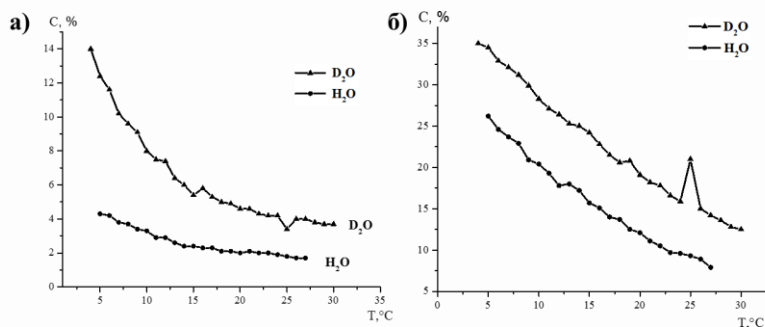


Рис. 1. Концентрация октамеров (а) и олигомеров (б) в кристаллизационном растворе лизоцима в D_2O и H_2O

Замена H_2O на D_2O приводит к увеличению процентного содержания олигомеров аналогично понижению температуры на ~ 10 °C, что хорошо согласуется с данным по растворимости лизоцима в H_2O на D_2O . [4]

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 18-32-00059 мол_а, № 18-32-20070 мол_а_вед)

Список литературы

1. Дьякова Ю.А., Ильина К.Б., Конарев П.В. Крюкова А.Е., Марченкова М.А., Благов А.Е., Волков В.В., Писаревский Ю.В., Ковальчук М.В. // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 375-380.
2. Boikova A.S., Dyakova Y.A., Ilina K.B., Konarev P.V., Kryukova A.E., Kuklin A.I., Marchenkova M.A., Nabatov B.V., Blagov A.E., Pisarevsky Yu.V., Kovalchuk M.V. // Acta Cryst. D73. 2017. P. 591-599
3. Бойкова А.С., Дьякова Ю.А., Ильина К.Б., Конарев П.В., Крюкова А.Е., Марченкова М.А., Благов А.Е., Писаревский Ю.В., Ковальчук М.В. // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 6. С. 876-881.
4. Gripon C., Legrand L., Rosenman I., Vidal O., Robert M.C., Boue F. // J. Cryst. Growth. 1997. V. 177. P. 238-247.

В.Е. АНИКЕЕВА^{1,2}, К.Н. БОЛДЫРЕВ², О.И. СЕМЁНОВА³¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный²Институт спектроскопии РАН, Троицк³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ПЕРОВСКИТА $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Синтезированы монокристаллы $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Состав и структура синтезированных кристаллов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ подтверждены методами РФЭС, дифракцией быстрых электронов на отражение и методом рентгеновской дифракции. Исследованы структурные фазовые переходы в спектрах фотолюминесценции, фототока и спектрах пропускания. Зарегистрированы и изучены колебательные спектры как отдельно молекулы метиламмония, так и общей структуры монокристалла.

V.E. ANIKEEVA^{1,2}, K.N. BOLDYREV², O.I. SEMENOVA³¹Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny²Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk³Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk

STRUCTURAL PHASE TRANSITIONS IN PEROVSKITE $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ SINGLE CRYSTALS

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals were synthesized. The composition and structure of the synthesized $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ crystals were confirmed by XPS, RHEED and by X-ray diffraction. The structural phase transitions were studied in the photoluminescence spectra, photocurrent spectra, and transmission spectra. The vibrational spectra of both the individual methylammonium molecules and the general perovskite structure of the single crystal were recorded and studied.

Металл-органические перовскиты в последнее время представляют большой интерес как новые материалы для фотовольтаики. Благодаря таким физическим свойствам как оптимальная ширина запрещённой зоны (1,5 эВ), высокое значение диффузионной длины (175 мкм) и коэффициента поглощения видимого излучения (10^5 см^{-1}), достигнутый КПД солнечных элементов на основе перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ составляет 22 % [1]. Кроме того, перечисленные характеристики $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ позволяют использовать данный материал в детекторах рентген- и гамма-лучей [2], а также в лазерах и светодиодах [3].

В данной работе были синтезированы и исследованы монокристаллы иодида свинца-метиламмония со структурой перовскита, фотографии которых представлены на рис. 1. Состав синтезированных кристаллов был подтверждён методом РФЭС, на полученных спектрах присутствуют все элементы, входящие в соединение $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$. Методом рентгеновской дифракции были определены параметры элементарной ячейки ($a = 8.8776(7) \text{ \AA}$, $b = 8.8776(7) \text{ \AA}$, $c = 12.6702(8) \text{ \AA}$, $V = 998.56(17) \text{ \AA}^3$) и пространственная группа ($I4/mcm$). Анализ картины дифракции быстрых электронов на отражение позволяет сделать вывод о том, что синтезированные монокристаллы имеют структурное совершенство поверхности.

Для изучения структурных фазовых переходов в $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ были проведены исследования спектральных зависимостей фототока, фотолюминесценции и пропускания в широком температурном диапазоне. При температуре 85 К в спектрах фототока виден экситонный пик (1,63 эВ), а в интервале от 140 до 160 К явное преобразование спектра свидетельствует о фазовом переходе от орторомбической фазы к тетрагональной. Кроме того, были проведены исследования спектров в области внутренних и внешних колебаний молекулы метиламмония, которые показали не только изменение структуры перовскита, но и трансформацию самой молекулы.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №18-32-20142 мол_а_вед.



Рис. 1. Фотография синтезированных монокристаллов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Список литературы

1. Yang W.S., Park B.-W., et. al. // Science. 2017. V. 356. P. 1376.
2. Yakunin S., Dirin D.N., et. al. // Nat. Photonics. 2016. V. 10. P. 585.
3. Xing G., Mathews N., et. al. // Nat. Mater. 2014. V. 13. P. 476.

А.С. БОЙКОВА^{1,2}, К.Б. ИЛЬИНА^{1,2}, М.А. МАРЧЕНКОВА^{1,2},
А.Ю. СЕРЕГИН^{2,1}, А.В. РОГАЧЕВ², Ю.А. ДЬЯКОВА^{2,1},
Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ^{1,2}, М.В. КОВАЛЬЧУК^{2,1}

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕНГМЮРОВСКОГО СЛОЯ БЕЛКА ЛИЗОЦИМА, СФОРМИРОВАННОГО ИЗ ПОЛИДИСПЕРСНОГО РАСТВОРА НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Приведены результаты исследования структурных особенностей ленгмюровских монослоев белка лизоцима на поверхности жидкости, сформированных из двух типов растворов: без добавления осадителя (монодисперсный раствор) и с добавлением осадителя в условиях, соответствующих кристаллизации лизоцима тетрагональной сингонии (полидисперсный раствор) с помощью метода стоячих рентгеновских волн в области полного внешнего отражения. Было показано, что олигомеры лизоцима, образующиеся в растворе на начальной стадии кристаллизации, принимают активное участие в формировании ленгмюровского слоя и оказывают влияние на его структуру.

A.S. BOIKOVA^{1,2}, K.B. ILINA^{1,2}, M.A. MARCHENKOVA^{1,2},
A. Yu. SEREGIN^{2,1}, A. V. ROGACHEV², Yu.A. DYAKOVA^{2,1},
Yu.V. PISAREVSKIY^{1,2}, M.V. KOVALCHUK^{2,1}

¹*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow*

²*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow*

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF LYSOZYME LANGMUIR LAYER GROWN ON A LIQUID SURFACE FROM AN OLIGOMERIC MIXTURE FORMED IN THE EARLY STAGES OF LYSOZYME CRYSTALLIZATION

The results of the study of the structural features of the Langmuir monolayers of lysozyme protein on the surface of a liquid subphase formed from two types of solutions are presented: without adding a precipitant (monodisperse solution) and with adding a precipitant under conditions corresponding to the crystallization of a lysozyme tetragonal system (polydisperse solution) using the method of the X-ray standing waves

under total external reflection conditions. It was shown that oligomers of lysozyme, formed in a solution at the initial stage of crystallization, play an active role in the formation of the langmuir layer and affect its structure.

Ранее было обнаружено, что в растворе белка лизоцима при добавлении осадителя в условиях роста кристалла тетрагональной сингонии образуются олигомерные частицы лизоцима [1]. Было предположено, что такие олигомеры, образующиеся в растворе, будут оказывать непосредственное влияние на структуру белковой пленки. Для исследования ленгмюровских монослоев лизоцима был применен метод стоячих рентгеновских волн в области полного внешнего отражения. Данный метод, сочетающий возможности рентгеновского рассеяния и спектроскопии, позволяет получить информацию о распределении атомов определенного типа в структуре тонких пленок и монослоев. Было показано, что монослои, сформированные на поверхности жидкости из полидисперсного раствора, содержащего олигомеры лизоцима, имеют толщину, соответствующую радиусу наибольшего олигомера – октамера (рис. 1) [2]. Также было показано, что ионы осадителя KCl формируют на границе раздела пленка/жидкость тонкие слои толщинами около 1 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 18-32-00381 мол_а.

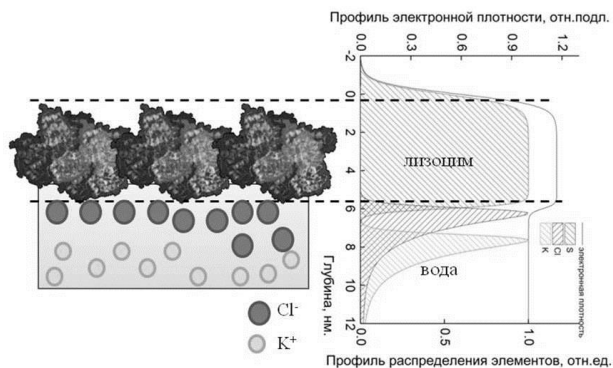


Рис. 1. Схематическое изображение ленгмюровского монослоя лизоцима, сформированного из полидисперсного раствора, а также профили распределения атомов (S, K и Cl) по толщине пленки

Список литературы

1. Boikova A.S., Dyakova Y.A., et. al. // Acta Cryst. D. 2017. V. 73. P. 591.
2. Kovalchuk M.V., Blagov A.E., et. al. // Cryst. Growth Des. 2016. V. 16. (4). P. 1792.

Н.А. НИКОЛАЕВ^{1,2}, С.А. КУЗНЕЦОВ^{3,4}

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

²*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

⁴*Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники - филиал
Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

ТЕРАГЕРЦОВАЯ МЕТАПОВЕРХНОСТЬ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ К УГЛУ ПАДЕНИЯ РЕЗОНАНСОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОК СУБМИКРОННОЙ ТОЛЩИНЫ

Предложен новый подход для определения свойств диэлектрических пленок субмикронной толщины при взаимодействии одночастотного ТГц излучения с метаповерхностью, обладающей узкополосным резонансом, чувствительным к углу падения излучения. Приведены численные расчёты и экспериментальные результаты, подтверждающие работоспособность данного подхода.

N.A. NIKOLAEV^{1,2}, S.A. KUZNETSOV^{3,4}

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

²*Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk*

³*Novosibirsk State University, Novosibirsk*

⁴*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk Branch "TDIAM"*

TERAHERTZ METASURFACE WITH ANGLE-SENSITIVE RESONANCE FOR SUBMICRON-THICK FILM STUDIES

A new approach is proposed for determining the properties of the submicron-thick films based on an interaction of single-frequency THz wave with a metasurface, with a narrowband resonance sensitive to the radiation incidence angle. Numerical calculations and experimental results are presented, confirming the feasibility of this approach.

Тонкопленочные покрытия широко используются в передовых промышленных и научных приложениях, в связи с чем развитие новых методов их характеристики является востребованным. В данном ключе терагерцовое (ТГц) излучение альтернативно видимым и ИК-волнам для исследования оптически непрозрачных покрытий. Традиционно в данном случае применяются плазмонные метаповерхности (ПМП), положение резонанса которых чувствительно к диэлектрическому окружению благодаря высокой локализации поля [1-3], при этом они облучаются под фиксированным углом θ . Путём измерения спектра

пропускания/отражения ПМП в отсутствие и при наличии анализта (тонкого слоя исследуемого вещества) определяется смещение резонансного пика, связанное с изменением диэлектрических свойств окружения ПМП и толщиной анализта. Нами предлагается применять ПМП, с высокодобротным резонансом, чувствительным к θ . При линейной зависимости частоты резонанса от θ частотный спектр пропускания/отражения ПМП может быть однозначно заменён на угловой спектр пропускания/отражения при фиксированной длине волны, что устраняет необходимость проведения спектральных измерений и позволяет заменить дорогие терагерцовые спектрометры компактными полупроводниковыми одночастотными источниками.

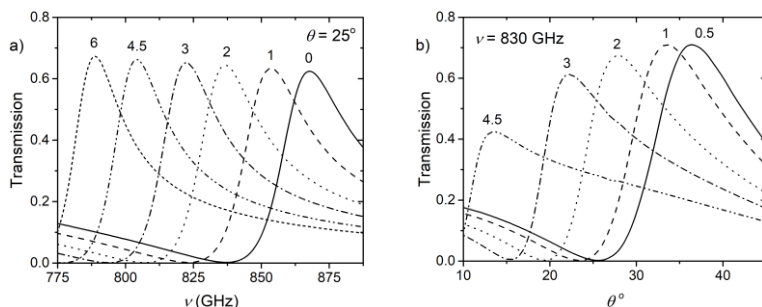


Рис. 1. Спектры пропускания ПМП, покрытой слоем анализта различной толщины d в мкм и облучаемой под фиксированным углом $\theta = 25^\circ$ (a) и переменным углом на фиксированной длине волны 830 ГГц (b)

Рис. 1 иллюстрирует предложенную идею. На рис. 1a приведено пропускание ПМП при фиксированном $\theta = 25^\circ$. Резонансный пик смещается в низкие частоты при увеличении толщины анализта. На рис. 1b представлено пропускание тех же образцов на фиксированной частоте 830 ГГц при изменении θ от 10 до 45° . Также наблюдается смещение углового пика с утолщением анализта. Амплитуда пика уменьшается и его уширение происходит быстрее, что означает ухудшение чувствительности метода для $d > 4,5$ мкм. Тем не менее, пик стабилен по амплитуде для $d < 1$ мкм, а минимум пропускания в совокупности с максимумом может использоваться для повышения точности определения толщины анализта.

Список литературы

1. Xu W., Xie L., Ying Y. // *Nanoscale*. 2017. V. 37. P. 13864.
2. Su L., Mata-Contreras J., Vález P., Martín F. // *Int. J. Antenn. Propag.* 2017. P. 2017.
3. Al-Naib I., Withayachumnankul W. // *J. Infrared Millim. Te.* 2017. V. 38. P. 1067.

М.О. ЖУКОВА, Я.В. ГРАЧЕВ, Е. КОВАЛЬСКА¹, Б. ХОГАН¹,
А. БАЛДЫЧЕВА¹, А.Н. ЦЫПКИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург
¹Экстерский университет, Великобритания

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

Приведены экспериментальные результаты исследования оптических свойств многослойного графена интеркалированного FeCl_3 и тонкой пленки дисульфида вольфрама (WS_2), а также его жидкокристаллической модификации, в инфракрасном и терагерцовом диапазонах частот. Показано, что интеркаляция малослойного графена приводит к оптическому просветлению в диапазоне 700-1100 нм. В ТГц диапазоне частот подбор подложки позволяет изменять пропускание интеркалированных слоев графена до 30%. Продемонстрировано, что пленки WS_2 на подложке полиимида обладают высокой прозрачностью в ТГц диапазоне.

М.О. ZHUKOVA, Ya.V. GRACHEV, E. KOVALSKA¹, B. HOGAN¹,
A. BALDYCHEVA¹, A.N. TSYPKIN

ITMO University, Saint-Petersburg
¹University of Exeter, Great Britain

MODIFIED 2D MATERIALS FOR TERAHERTZ TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY APPLICATIONS

Experimental results on the studies of optical properties of multilayer FeCl_3 intercalated graphene and tungsten disulfide thin film (WS_2), as well as its liquid crystal modification, in the infrared and terahertz frequency ranges are presented. It is shown that the intercalation of multilayer graphene leads to optical translucence in the range 700-1100 nm. In the THz frequency range, selection of the substrate allows changing the transmission of intercalated graphene layers up to 30%. It is demonstrated that WS_2 films on a polyimide substrate are highly transparent in the THz frequency range.

Несмотря на распространённое использование технологии терагерцовой (ТГц) спектроскопии с разрешением во времени, по-прежнему наблюдается нехватка эффективных и компактных материалов для генерации, детектирования и преобразования ТГц излучения. Одним из решений является использование двумерных материалов, таких как графен [1], дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама (WS_2) [2],

которые, как было показано, демонстрируют уникальные свойства в прототипах ТГц устройств. При использовании двумерных материалов в качестве элементов в системах ТГц спектроскопии следует учитывать влияние подложки, как в ТГц, так и в ИК диапазонах частот.

В данной работе исследуется пропускание структур на основе малослойного и многослойного графена интеркалированного FeCl_3 [3] на подложках из стекла, сапфира и полиимида в ближнем инфракрасном и ТГц (0,1-2 ТГц) диапазонах частот. Также приведены результаты исследований оптических свойств тонкой пленки дисульфида вольфрама (WS_2), а также его жидкокристаллической модификации, на полиимидной подложке в указанных диапазонах частот.

Исследование пропускания в ТГц диапазоне частот проводилось с помощью лабораторного ТГц-спектрометра со средней мощностью 30 нВт. Для образцов модифицированного графена наблюдается влияние примеси FeCl_3 и типа подложки, которое выражается в изменении пропускания в диапазоне 0,2-0,8 ТГц [3].

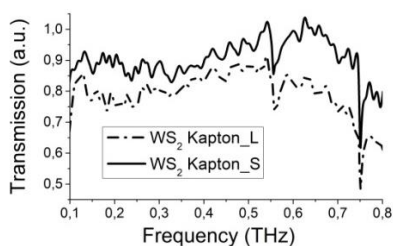


Рис. 1. Спектры пропускания WS_2 в различной морфологии на полиимиде (Kapton)

Жидкие кристаллы дисульфида вольфрама WS_2 продемонстрировали значительное двулучепреломление, как наблюдалось в измерениях линейного (видимый диапазон) и кругового дихроизма (500-800 нм), соответственно. WS_2 на подложке из полиимида оказался в значительной степени прозрачен в диапазоне 0,1-1 ТГц (рис. 1). Можно предположить, что если хиральность WS_2 была показана в видимом диапазоне, она также может проявляться в ТГц диапазоне частот. Кроме того с помощью WS_2 можно будет управлять магнитным полем ТГц импульса [4].

Список литературы

1. Mittleman D.M. // Journal of Applied Physics. 2017. V. 122 (23). P. 230901.
2. Docherty C.J., et. al. // ACS nano. 2014. V. 8 (11). P. 11147-11153.
3. Zhukova M.O. et. al. // Proc.ICLO 2018. 2018. P. 395-395.
4. Walowski J., Münzenberg M. // Journal of Applied Physics. 2016. V. 120 (14). P. 140901.

Д.И. ХУСЯИНОВ, А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

**ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ
НА ГЕНЕРАЦИЮ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ InGaAs**

Приведены результаты генерации ТГц импульсов с поверхности твердого раствора InGaAs методом терагерцевой спектроскопии временного разрешения в диапазоне энергий фотонов лазерных импульсов накачки от 1.24-1.65 эВ. Продемонстрировано увеличение интегральной мощности генерируемого ТГц излучения при увеличении энергии фотонов лазерных фемтосекундных импульсов оптической накачки.

D.I. KHUSYAINOV, A.M. BURYAKOV, E.D. MISHINA
MIREA – Russian Technological University, Moscow

**EFFECT OF EXCESS ENERGY ON GENERATION
OF THE TERAHERTZ RADIATION
IN InGaAs SOLID SOLUTION**

Generated THz pulses in InGaAs solid solution were observed by THz time-domain spectroscopy in pump photon energy range from 1.24 to 1.65 eV. Enhancement of the THz power of the generated THz radiation was shown with photon energy increasing of the optical pump femtosecond laser pulses.

За последние несколько лет исследования в области полупроводниковых фотопроводящих терагерцевых антенн вызывают большой интерес [1, 2]. Помимо практических применений, фундаментальные исследования генерации терагерцевого излучения с поверхности полупроводников при взаимодействии с фемтосекундными лазерными импульсами позволяют лучше понять механизмы возникновения данного явления [3, 4].

Избыточная энергия описывается соотношением $E_{\text{exc}} = h\nu - E_g$, где $h\nu$ – энергия фотона, а E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника. В предыдущей теоретической работе [4] утверждалось, что с увеличением избыточной энергии растет мощность ТГц излучения, генерируемого классическими полупроводниками.

Целью данной работы является экспериментальное исследование характеристик генерируемых терагерцевых импульсов с поверхности

твердого раствора InGaAs при накачке фемтосекундными лазерными импульсами для оценки влияния избыточной энергии на генерацию терагерцевого излучения. Для исследования генерации ТГц излучения использовалась методика терагерцевой спектроскопии временного разрешения. Регистрация проводилась при помощи метода электрооптической выборки [5]. В качестве источника фемтосекундных лазерных импульсов использовался лазер MaiTai Spectra-Physics с диапазоном перестройки длины волны от 750 до 1000 нм. Образец $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИСВЧПЭ РАН. Было продемонстрировано увеличение интегральной мощности терагерцевого излучения при увеличении энергии фотонов лазерных импульсов накачки (рис. 1).

Эта работа поддержана грантом централизованного фонда РГУ МИРЭА № НИЧ-42 и гранта РФФИ (16-29-14029 офи_м).

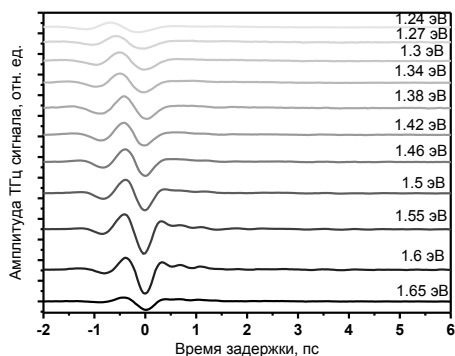


Рис. 1. Временная форма терагерцевых импульсов (графики смещены по вертикальной оси для наглядности)

Список литературы

1. Globisch B., et al. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. № 5. P. 53102.
2. Globisch B., et al. // AIP Advances. 2016. V. 6, № 12. P. 125011.
3. Liu K., et al. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 15. P. 155330.
4. Alfaro-Gomez M., Castro-Camus E. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. № 4. P. 42101.
5. Kovalev S.P., Kitaeva G.K. // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V. 30. № 10. P. 2650.

Е.В. ОСИПОВ, И.Л. МАРТЫНОВ, Ю.А. КУЗИЩИН,
А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМАЯ ТЕРМОДЕСОРБЦИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

В настоящей работе изучено влияние нагрева в температурном диапазоне от 25 до 150 °С на оптические и люминесцентные свойства микрорезонаторов на основе пористого кремния с внедрёнными полимерами класса PPV. Установлено, что нагрев микрорезонатора до температуры ~ 50 °С позволяет за счет термодесорбции эффективно очищать его поверхность от загрязнений. Полученные данные могут быть использованы на практике для оптимизации режимов работы и увеличения чувствительности сенсоров на базе пористого кремния, а также создания систем их регенерации после длительного использования.

E.V. OSIPOV, I.L. MARTYNOV, Yu.A. KUZICHIN,
A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICALLY CONTROLLED THERMAL DESORPTION FROM THE SURFACE OF POROUS SILICON

The influence of heating on pSi microcavity with infiltrated PPV polymer was studied in temperature range from 25 to 150 °C. The heating of pSi microcavity up to ~50 °C cleans the surface one from non-specific impurities effectively via thermal desorption process. The experimental results obtained in the study are useful to increase the detection limit of sensor based on pSi and to develop regeneration system to clean pSi surface after long operation.

В настоящее время пористые структуры, в том числе и пористый кремний, часто используются в качестве сенсоров [1]. Особый интерес представляют микрорезонаторы на основе пористого кремния (ПК), которые имеют характерный спектр отражения и пропускания с явно выраженной собственной модой в середине запрещенной зоны. Традиционно сенсоры на основе такой структуры работают на эффекте сдвига собственной моды за счет изменения эффективного показателя преломления структуры при сорбции молекул на поверхность микрорезонатора. Стоит отметить, что такие сенсоры не обладают

высокой чувствительностью. Для создания высокочувствительных сенсорных элементов, имеющих специфичность к определенному типу молекул, поверхность микрорезонаторов на основе ПК подвергают химической модификации. Например, для создания сенсорных элементов чувствительных к нитроароматическим соединениям в пористую структуру микрорезонатора внедряют растворы полимеров класса PPV [2, 3]. В последних используется эффект тушений фотолюминесценции полимера, за счет фотоиндуцированного переноса электрона с молекулы тушителя на полимерную цепочку. Однако применение сенсоров на основе ПК на практике требуют дополнительных исследований о влиянии внешней среды на параметры такого устройства.

В рамках настоящей работы проведено подробное исследование влияния нагрева микрорезонаторов на основе пористого кремния с внедренным сопряженным полимером класса поливинилениленов (PPV) на их оптические свойства. Было проведено две серии экспериментов. В первой серии нагреву подвергались микрорезонаторы на основе ПК без органического полимера, а во второй итоговые композиты (микрорезонаторы с внедренным полимером). Такой подход был использован для того что бы разделить эффекты обусловленные влиянием температуры микрорезонатор на основе ПК и органический полимер. Был продемонстрирован сдвиг собственной моды резонатора в результате термодесорбции неспецифических молекул с поверхности структуры.

Для дополнительного изучения процессов десорбции неспецифических молекул были получены хромато-масс спектры. Данные исследования проводились в режиме тремопрограммируемой десорбции, для ионизации десорбированных молекул использовался стандартный электронно удар с энергией электронов 60 эВ.

Также продемонстрирована стабильность фотолюминесцентного сигнала от полимера, внедренного в микрорезонатор из пористого кремния при нагреве до 100 °С, с последующим частичным снижением температуры до комнатной.

Список литературы

1. Котковский Г.Е., et. al. Фотофизические свойства пористого кремния и его применение в технике и биомедицине // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. V. 4. № 2. P. 174-192.
2. Osipov E.V., et. al. Silicon photonic structures with embedded polymers for novel sensing methods // Opt. Spectrosc. 2017. V. 122. № 1. P. 74-78.
3. Tokranova N.A., et. al. Deep Infiltration of Emissive Polymers into Mesoporous Silicon Microcavities: Nanoscale Confinement and Advanced Vapor Sensing // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. № 44. P. 22667–22676.

А.Ю. АВДЕЕВА¹, С.Я. ВЕТРОВ^{1,2}, И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск*

ГИБРИДНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ОГРАНИЧЕННОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СЛОЕМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С НАНОКОМПОЗИТНЫМ ДЕФЕКТОМ

Продемонстрировано существование гибридных оптических мод, обусловленных связью между микрорезонаторными (МР) модами фотонного кристалла (ФК) с нанокompозитным дефектом, и оптическим таммовским плазмон-поляритоном (ТПП) образованным на границе ФК и металлической пленки. Показана возможность управления спектральными свойствами ФК структуры, при помощи варьирования толщины слоя, прилегающего к металлу, вариации фактора заполнения нанокompозита.

A. Yu. AVDEEVA¹, S. Ya. VETROV^{1,2}, I. V. TIMOFEEV^{1,2}

¹*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

²*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk*

HYBRID STATES IN CONFINED BY METAL LAYER PHOTONIC CRYSTAL WITH NANOCOMPOSITE DEFECT

It demonstrates the existence of hybrid optical modes caused by coupling between the microresonator (MR) modes of photonic crystal (PC) with nanocomposite defect and optical Tamm plasmon-polariton (TPP) formed at the interface of PC and the metal film. The possibility of controlling the spectral properties of PC structure is shown by means of varying the layer thickness adjacent to the metal, the variation of filling nanocomposite factor.

В последние годы возрос интерес к гибридным модам, возникающим при одновременном возбуждении в ФК системе ТПП и МР мод. В работах [1, 2] гибридные таммовские состояния были обнаружены экспериментально.

В настоящей работе мы исследуем оптические гибридные моды в ФК ограниченном слое металла и содержащем дефектный слой металл-диэлектрического нанокompозита (рис. 1). В случае совпадения частоты локализованной дефектной моды ФК с резонансом нанокompозита в спектре отражения наблюдаются две МР моды [3]. ТПП реализуется на границе ФК и металлической пленки. Вариация толщины первого слоя

ZrO_2 , прилегающего к пленке, позволяет управлять положением ТПП в запрещенной зоне ФК, и получить последовательную гибридизацию ТПП с МР модами (рис. 2).

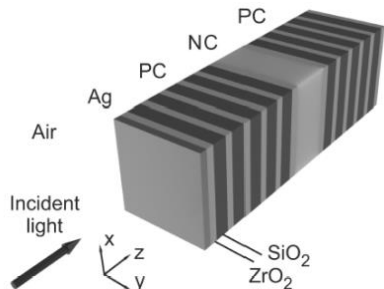


Рис. 1. Схема ФК ограниченного пленкой серебра толщиной 40 нм, в качестве дефектного слоя металл-диэлектрический нанокompозит с фактором заполнения 1 %

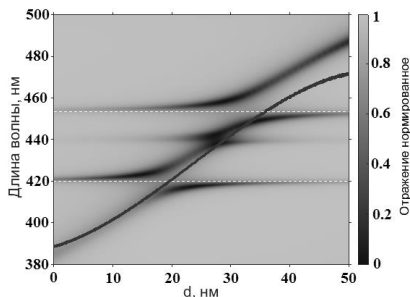


Рис. 2. Нормированный спектр отражения R/R_{\max} от толщины первого слоя d , штриховые линии соответствуют положению МР мод, сплошная линия положению чистого ТПП [4]

Таким образом, нами продемонстрировано существование гибридных оптических мод, обусловленных связью между МР модами ФК с нанокompозитным дефектом, и оптическим ТПП на границе ФК и металлической пленки. Показана возможность управления спектральными свойствами, при помощи варьирования толщины слоя прилегающего к металлу. Дополнительное управление спектральными свойствами возможно за счет вариации фактора заполнения нанокompозита.

Список литературы

1. Brückner R., Sudzius M., et. al. // Phys. Rev. B. 2011 V. 83. P. 033405.
2. Brückner R., Sudzius M., et. al. // Applied phys. Letters. 2012. V. 100. No. 6. P. 0-4.
3. Ветров С.Я., Авдеева А.Ю., Тимофеев И.В. // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. № 4(10). С. 1-8.
4. Панкин П.С. // Дисс. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Красноярск: СФУ, 2018.

О.Л. АЙВАЗЯН¹, Р.К. ОВСЕПЯН^{1,2}

¹*Российско-Армянский университет, Ереван, Армения*

²*Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения*

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА

Исследованы фотоэлектрические свойства пленок ZnO с акцепторной примесью ионов лития, полученные методом электронно-лучевого напыления. Получены пленки с р-типом проводимости. С использованием р-типа пленок ZnO:Li и n-ZnO:Ga созданы р-n-переходы. Изучены фотоэлектрические характеристики полученных р-n-переходов и механизм переноса носителей заряда в этих пленках. Исследовано влияние отжига на тип и механизм проводимости.

H.L. AYVAZYAN¹, R.K. HOVSEPYAN^{1,2}

¹*Russian-Armenian university, Yerevan, Armenia*

²*Institute for Physical Research, Ashtarak, Armenia*

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES BASED ON ZINC OXIDE

Investigated photoelectric properties of ZnO film with lithium acceptor impurity, received with electron-beam deposition. Received films with p-type conductivity. Created p-n junctions with p-type ZnO:Li and n-type ZnO:Ga films. Investigated photoelectric characteristic of that p-n junctions and transfer mechanism. Investigated impact of annealing on transfer mechanism.

Пленки оксида цинка (ZnO), относящиеся к широкозонным полупроводникам и обладающие множеством интересных свойств, находят широкое применение в оптоэлектронике в качестве активного материала для светодиодов, излучающих в сине-зеленом или УФ диапазонах. Эти пленки могут быть использованы для создания прозрачных дисплеев и прозрачной электроники для использования в этих дисплеях. Важным достоинством этих пленок является возможность управления их свойствами, типом проводимости и введением донорной или акцепторной примеси [1]. Примесь Ga в пленках ZnO действует как донор, увеличивая проводимость без ухудшения оптической прозрачности, в то время как примесь Li уменьшает их проводимость [2]. Создание пленок ZnO р-типа может расширить область их использования в оптоэлектронике.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния акцепторной примеси лития в ZnO и послеростового отжига на тип и механизм проводимости, а также получение р-n переходов на основе пленок р-ZnO:Li и n-ZnO:Ga. Представлены результаты исследований фотоэлектрических характеристик пленок обоих типов и р-n-переходов.

Чистые и легированные литием пленки ZnO для фотоэлектрических измерений были получены методом электронно-лучевого напыления в вакууме [3] с использованием сапфировых пластин с ориентацией (0001) в качестве подложек (рис. 1). Мишени для напыления изготавливались методом твердофазного синтеза с добавлением в ZnO примеси Li_2O_3 .

Изготовлен р-n переход с использованием мезотехнологии. В качестве омических электродов использовались тонкие пленки металлического алюминия (вклейка на рис. 2). Методом электронно-лучевого напыления были получены пленки с кристаллографической осью (0002), перпендикулярной поверхности подложки (см. рис. 2). Эти результаты показывают, что атомы Ga в ZnO являются донорами и увеличивают плотность электронов в зоне проводимости.

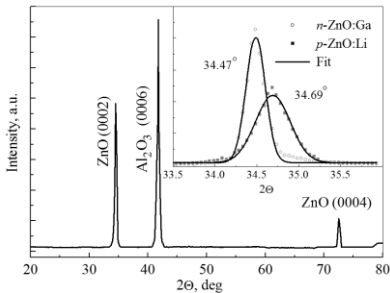


Рис. 1. Рентгенограмма пленок ZnO, на вклейке показан растянутый пик (0002) пленок ZnO:Li и ZnO:Ga

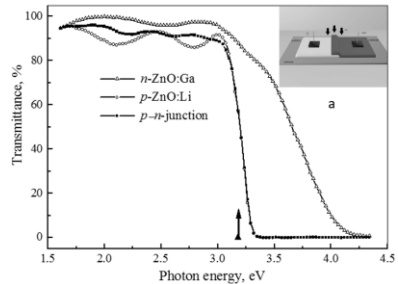


Рис. 2. Спектры пропускания пленок ZnO:Ga, ZnO:Li и планарного р-n-перехода, стрелкой указана энергия фотона, используемая для возбуждения фотопроводимости

Список литературы

1. Yamamoto T., Katayama-Yoshida H. // J. Cryst. Growth. 2000. V. 214/215. P. 552.
2. Aghamalyan N.R., Gambaryan I.A., Goulanian E.Kh., Hovsepyan R.K., R.B.
3. Aghamalyan N.R., Kafadaryan E.A., Hovsepyan R.K., Petrosyan S.I. // Semicon. Sci. Technol. 2005. V. 20. P. 80.

С.А. АЛИЕВ, Н.С. ТРОФИМОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА, Д.А. ЗАЕВ
Российский университет дружбы народов, Москва

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА

В работе исследуются спектры поглощения пленок диоксида титана, модифицированных наночастицами металлов и неметаллов, в том числе и углеродными наноматериалами. 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. Были проведены исследования реакций фоторазложения загрязнителей таких, как метил оранжевый (МО) и метил синий (МС). Модифицированные образцы показали увеличение скорости процесса фоторазложения.

S.A. ALIEV, N.S. TROFIMOV, T.K. CHEKHLOVA, D.A. ZAEV
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

RESEARCH OF PROPERTIES OF MODIFIED TITANIUM DIOXIDE PHOTOCATALIZERS

In this article were studied the absorption spectra of titanium dioxide films modified by nanoparticles of metals and nonmetals, including carbon nanomaterials. 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. Photodegradation reactions of pollutants such as methyl orange (MO) and methyl blue (MS) were studied. Modified samples showed an increase in the rate of photodegradation.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наночастиц различных металлов на фотокаталитические свойства пленок и порошков диоксида титана, изготовленных гель-методом. Гель-метод [1] позволяет получать образцы с содержанием модификации анатаза до 100 %. Анатаз играет доминирующую роль в фотокатализе из-за своего свойства, связанного с фотокаталической активностью (ФКА) и лёгким синтезом. Однако, TiO_2 может разрушать соединения до CO_2 и H_2O под воздействием УФ-света, в то же время он не может адсорбировать видимый свет с длиной волны больше чем 387 нм.

Было решено использовать ионы металлов или неметаллов, для уменьшения рекомбинации электронных пар [2]. Легированный TiO_2 является более предпочтительным, так как могут быть использованы УФ-фотокатализаторы с большим количеством света. В частности, комбинации наночастиц TiO_2 с углеродными наноматериалами, такими как: углеродные нанотрубки (УНТ) были предложены в качестве подходящих веществ для повышения фотокаталитической активности.

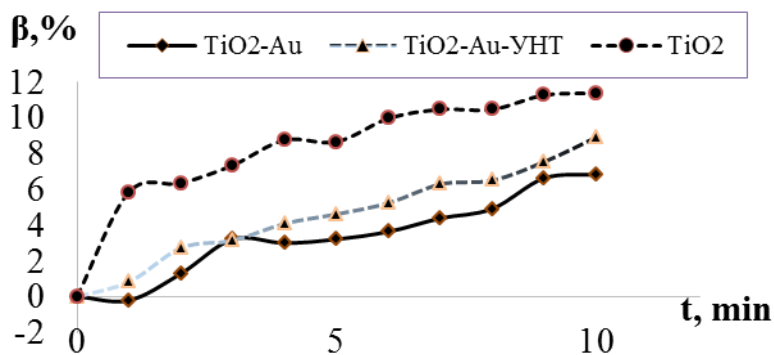


Рис. 1. Зависимости степени фоторазложения MO от длительности УФ-облучения

На рис.1 представлены фотокаталитические тесты с пленками диоксида титана на поверхности стекла. Видно, что, как и в случае порошков, зависимости степени фоторазложения красителя нелинейные. Добавки не оказали положительного влияния на фотоактивность TiO_2 -плёнки, однако было замечено, что образцы с УНТ имели лучшую механическую прочность (адгезию) и меньшую отслаиваемость от стеклянной подложки. Тестирование фотокаталитической активности полученных образцов в разложении красителя показало, что в случае тонких пленок TiO_2 фазы анатаза вводимые добавки существенно не улучшают фотокаталитическую активность, но и не снижают её. Наибольшее увеличение фотоактивности проявилось в образцах с содержанием Au 75 % / Cu 25 %.

Список литературы

1. 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.
2. Aliev S.A., Nikolaev N.E., Trofimov N.S., Kopyeva M.S., Chekhlova T.K. Optical Properties of Gel Titanium Dioxide Film, Modified By Metal Nanoparticles // KnE Energy & Physics. 2018. P. 73-82. DOI 10.18502/ken.v3i3.2015.

Д.А. КОМИССАР, Г.М. КРИВОВА, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ,
Ю.В. СТЕБУНОВ, А.В. АРСЕНИН

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

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ГРАФЕНА

Получены оптические свойства тонких пленок оксида графена (толщиной менее 60 нм) методом спектроскопической эллипсометрии. Пленки были получены с помощью воздушно-капельного распыления суспензии чешуек оксида графена. Получены зависимости n и k пленок от длины волны в диапазоне 300-3300 нм.

D.A. KOMISSAR, G.M. KRIVOVA, D.I. YAKUBOVSKY,
Yu.V. STEBUNOV, A.V. ARSENIN

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

GRAPHENE OXIDE OPTICAL PROPERTIES

We are reporting on the optical properties of graphene oxide thin films (thickness below 60 nm) determined by a spectroscopic ellipsometry. Films were prepared by spray coating method of the graphene oxide flakes water suspension. The wavelength dependencies of optical properties n and k were obtained within a spectral range of 300-3300 nm.

Двумерные материалы, в частности оксид графена обладают уникальными свойствами: большой эффективной площадью взаимодействия при толщине порядка 1 нм, а также невысокой стоимостью синтеза. Эти характеристики обуславливают их широкое применение в детекторах биологических молекул [1, 2], детекторах излучения, для создания новых функциональных материалов. Знание их оптических свойств необходимо для проектирования устройств, а также для проверки теоретических расчетов [3].

Целью данной работы является установление оптических параметров (n и k) оксида графена и исследование их зависимости от толщины пленки исследуемого материала.

Исследуемые образцы представляют собой пленки оксида графена нанесенные на подложку из кремния со слоем оксида кремния толщиной 285 нм. Пленки напылялись методом воздушно-капельного распыления суспензии чешуек оксида графена.

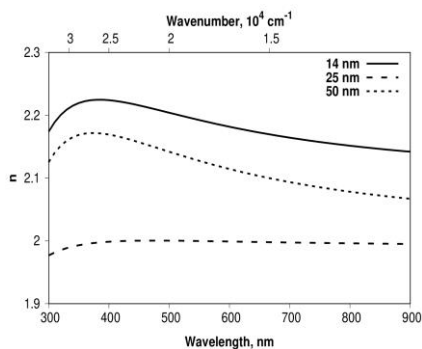


Рис. 1. Зависимость n от длины волны для пленок разной толщины: 14, 25 и 50 нм

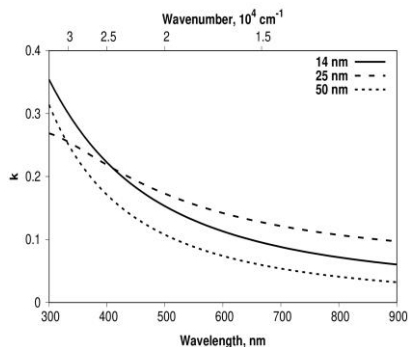


Рис. 2. Зависимость k от длины волны для пленок разной толщины: 14, 25 и 50 нм

Характерные зависимости показателя преломления n и волнового вектора k от длины волны (определяющие комплексный показатель преломления $\tilde{n} = n + ik$) для трех пленок различной толщины (14, 25 и 50 нм) представлены на рис. 1 и 2, соответственно. Выбранный оптический диапазон представленных данных (300-900 нм) обусловлен незначительным (менее чем на 5 %) изменением оптических параметров в ИК области (900-3300 нм).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №16-29-03432 и №18-07-01379.

Список литературы

1. Zhang H., Zhang H., et. al. // Biosensors & Bioelectronics. 2017. V.89 (1). P. 96-106.
2. Stebunov Yu.V., Aftenieva O.A., et. al. // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. V. 7 (39). P. 21727-21734.
3. Schoche S., Hong N., et. al. // Applied Surface Science. 2017. V. 421. P. 778-782.

С.В. БАЧИНИН, В.В. ЛЕНТОВСКИЙ

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Взрывчатые материалы являются важной энергетической составляющей экономики многих стран, а технологичность систем инициирования взрывчатых веществ влияет на обороноспособность государства. Ряд используемых первичных взрывчатых веществ являются крайне небезопасными и уязвимыми ко внешним воздействиям, в силу чего, особое внимание уделяется изобретению новых методов и способов инициирования взрывчатых веществ (ВВ), в том числе и вовсе без использования в первичных ВВ.

S.V. BACHININ, V.V. LENTOVSKII

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INITIATION EXPLOSIVES BY LASER EMISSION

Explosives are an essential energy component of the economy of many countries, and the manufacturability of systems for initiating explosives affects the defense capability of the state a number of primary explosives are extremely unsafe and vulnerable to external influences, so that special attention is paid to the invention of new methods and methods for initiating explosives, including without using at all in primary explosives.

Одним из основных элементов цепи лазерного инициирования является светочувствительные энергоемкие вещества. Перспективный класс светочувствительных ВВ – перхлораты d-металлов с гидразиноазолами в качестве лигандов [2-5]. Механизм инициирования координационных соединений лазерным моноимпульсом не установлен. Известно, что катионы металлов при инициировании комплексов выполняют роль катализаторов горения [6]. Исследования чувствительности комплексных перхлоратов к лазерному моноимпульсу проводились на лазерной установке с параметрами: $\lambda = 1,06$ мкм, $T_{\text{имп}} = 30$ нс, $d_{\text{луча}} = 0,48$ мм. Образцы были запрессованы в медные колпачки диаметром 5 мм и высотой 2 мм под давлением 400 кг. Из

полученных результатов можно сделать вывод, что комплексные перхлораты меди(II), кобальта(II), никеля(II), кадмия(II), являются энергоемкими светочувствительными веществами. Их чувствительность к лазерному моноимпульсу изменяется в соответствии с окислительной способностью центрального иона металла, выраженной в виде суммы потенциалов ионизации $I_1 + I_2$. Чем больше это значение, тем выше чувствительность соединения к лазерному излучению: $Cu > Cd > Ni > Co$. В ходе эксперимента, луч лазера фокусировался на поверхности исследуемого образца с помощью линзы, перемещением которой вдоль оптической оси относительно образца изменялся размер зоны воздействия. Энергия лазерного излучения поступающая на образец, регулировалась нейтральными светофильтрами и оценивалась по отраженной от делительной пластины части излучения в режиме моноимпульса с помощью наносекундного фотометра, а в режиме свободной генерации – с помощью прибора ИМО-2Н. Для определения времени задержки воспламенения использовался фотодатчик, смонтированный на базе кремниевого фотодиода ФД-256, сигнал с которого регистрировался осциллографом. В качестве источника лазерного излучения можно использовать лазер на стекле, активированном ионами неодима (Nd^{3+}) со следующими характеристиками: в режиме модуляции добротности пленочным затвором – выходная мощность 4-8 кВт, длительность импульса $5 \cdot 10^{-4}$ с, в режиме модуляции добротности пассивным затвором на ЦГК - выходная мощность 0.5 МВт, длительность импульса $5 \cdot 10^{-8}$ с.

Список литературы

1. Чернай А.В. Зажигание взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением // Физика импульсной обработки материалов / Под. ред. П.Д. Саркисова. М.: Минобразование РФ, РХТУ, 2003.
2. Энергетические конденсированные системы: Кр. Энциклопед./ Под ред. Б.П. Жукова. М: Янус-К, 2000.
3. Акимова Л.Н. // Химическая физика. 2002.
4. Жилин А.Ю. // Химическая физика. 2002.
5. Дудырев А.С. Технология энергонасыщенных соединений и продуктов на их основе// Физика импульсной обработки материалов / Под. ред. П.Д. Саркисова. М.: Минобразование РФ, РХТУ, 2003.
6. Илюшин М.А. // Рос. хим. ж-л. 2001.

Е.М. ПЕРЧЕНКО, К.А. САВИН, Д.В. АМАСЕВ¹

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПЕДАНСА ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Методом импедансной спектроскопии исследованы образцы полимерных систем с неорганическими наночастицами. Построены годографы и частотные зависимости проводимости. Установлено влияние наночастиц на изучаемые образцы. Предложенная эквивалентная схема замещения исследована аналитически и численно с помощью программы MATLAB.

E.M. PERCHENKO, K.A. SAVIN, D.V. AMASEV¹

Lomonosov Moscow State University

¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL MODELING OF IMPEDANCE OF POLYMERIC SYSTEMS WITH INORGANIC PARTICLES

Samples of polymeric systems with inorganic nanoparticles were studied via impedance spectroscopy methods. Nyquist plots of the imaginary and real parts of the impedance and frequency dependences of conductivity were presented. The effect of nanoparticles on the studied samples was established. The Adopted equivalent electrical circuit was investigated analytically and numerically using the MATLAB program.

В настоящее время всё большую популярность для использования в оптоэлектронике и солнечной энергетике набирают композиты из полимера и неорганических наночастиц [1-4]. Достаточно много работ, имеющих в настоящее время, посвящено изучению электрофизических свойств приборов (в частности, солнечных элементов) на основе таких композитов, однако сами эти композиты исследуются крайне редко. Изучение электрофизических и транспортных свойств таких структур является необходимым для получения достаточной информации о механизмах переноса носителей заряда в них, а, следовательно, и для

разработки приборов на их основе с наилучшими характеристиками.
Numerical investigation

В данной работе методом импедансной спектроскопии исследовались электрофизические свойства композитов на основе полианилина (ПАНИ), содержащего разные концентрации кремниевых наночастиц (ПАНИ/nc-Si). Для выявления влияния кремниевых наночастиц на электрофизические свойства ПАНИ/nc-Si были исследованы также образцы ПАНИ, не содержащие кремниевых наночастиц. Исследования проводились на импеданс анализаторе Hewlett-Packard 4192A в диапазоне частот 5 Гц - 13 МГц. Амплитуда переменного сигнала составляла 30 мВ. Для ряда измерений помимо переменного сигнала на образцы подавалось постоянное смещение в диапазоне от -3 до 3 В.

В результате проведенных измерений были построены годографы импеданса (зависимости мнимой части импеданса от действительной части импеданса) композитов ПАНИ/nc-Si и предложена эквивалентная схема замещения, учитывающая как сопротивление и емкость самого композита, так и сопротивление и емкость подводящих электрических контактов. Предложенная схема замещения была численно проанализирована с помощью программы MATLAB. Были подобраны параметры ёмкостей и сопротивлений, реализующие наилучшее совпадение теоретических зависимостей с экспериментальными. С помощью предложенной эквивалентной схемы объяснены частотные зависимости проводимости композитов ПАНИ/nc-Si. Выявлена также роль кремниевых наночастиц в процессах переноса носителей заряда в композитах ПАНИ/nc-Si.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-32-00417 мол_a).

Список литературы

1. Mayer A.C., Scully S.R., Hardin B. E., Rowell M.W., McGehee M. D. Polymer based solar cells // Materials today. 2007. V. 10. № 11. P. 28-33.
2. Wright M., Uddin A. Organic—inorganic hybridsolarcells: A comparative review // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2012. V. 107. P. 87-111.
3. Svrcek V. Hybrid Optoelectronic and Photovoltaic Materials based on Silicon Nanocrystals and Conjugated Polymers // Optoelectronic Devices and Properties. 2011. V. 10. P. 197-215.
4. Zaidan K.M., Hussein H.F., Talib R.A., Hassan A.K. Synthesis and characterization of (Pani/n-si)solar cell // Energy Procedia. 2011. V. 6. P. 85-91.

Д.Н. БУХАРОВ, С.М. АРАКЕЛЯН, М.Н. ГЕРКЕ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСТРОВКОВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛЕНКИ РЬТЕ

Приведены результаты расчетов значения коэффициента пропускания в зависимости от толщины пленки, который рассчитывался исходя из закона Бугера-Ламберта для случая сильного поглощения при отсутствии многократных внутренних отражений, а так же с учетом влияния подложки.

D.N. BUKHAROV, S.M. ARAKELIAN, M.N. GERKE

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

MODELING OF THE OPTICAL PROPERTIES OF ISLAND SEMICONDUCTOR РЬТЕ FILM

The results of calculations of the transmittance value depending on the film thickness are presented. The transmittance was calculated on the basis of the Bouguer-Lambert law for the case of strong absorption in the absence of multiple internal reflections, as well as taking into account the effect of the substrate.

Полупроводниковые островковые пленки широко используются в различных областях науки и техники. Особый интерес представляет описание моделирование оптических свойств таких наноструктур. При прохождении оптического излучения через полупроводник происходит его ослабление вследствие процессов отражения и поглощения, поэтому необходимо оценивать значения коэффициента пропускания T_λ в зависимости от толщины пленки. В случае хорошо сформированных островковых пленок, когда расстояния между островками сильно меньше их средних размеров, воспользуемся законом Бугера–Ламберта для случая сильного поглощения при отсутствии многократных внутренних отражений:

$$T_\lambda = (1-R)^2 \exp(-\alpha_\lambda d),$$

где $R = (n-1)^2/(n+1)^2$ – коэффициент отражения от поверхности; n – показатель преломления материала островковой пленки; α_λ – коэффициент поглощения; d – толщина пленки.

Для случая разреженных островковых пленок, существенный вклад в коэффициент пропускания вносит подложка, на которой формируется структура:

$$T_{\lambda} = (1-R_1)(1-R_2)(1-R_3)\exp(-\alpha_{\lambda}d),$$

$$R_1 = (n_f-1)^2/(n_f+1)^2, R_2 = (n_f-n_s)^2/(n_f+n_s)^2, R_3 = (n_s-1)^2/(n_s+1)^2,$$

где n_f – показатель преломления материала пленки; n_s – показатель преломления материала подложки [1].

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента пропускания от толщины пленки при варьировании до 20 нм для случая хорошо сформированной пленки (1) и случая разреженных островков с учетом подложки из стекла (2) $n_s = 1,5$ при длине волны излучения 1.06 мкм при температуре 300 К, $n = n_f = 6$, $\alpha_{\lambda} = 0,5$ [2].

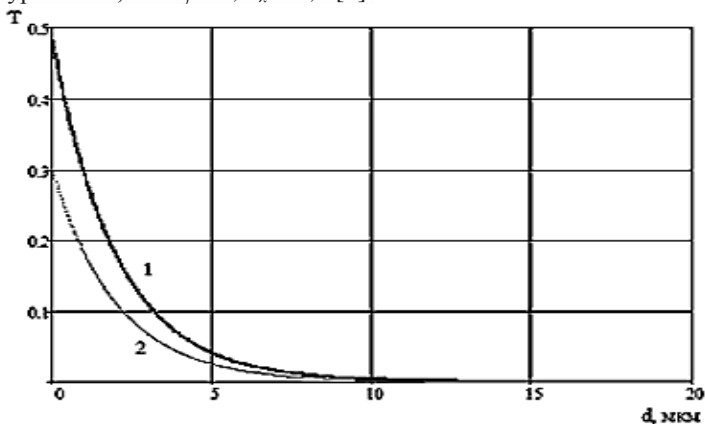


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания от толщины пленки

Очевидно, величина коэффициента пропускания для случая хорошо сформированной пленки выше, чем для разреженной, что объяснимо влиянием отражений и рассеяний на границе пленки и подложки.

Предложенная модель позволит в первом приближении оценить оптические свойства полученных пленок [3], а также толщину формируемой структуры с заданными характеристиками пропускания.

Работа выполнена при поддержке гранта государственного задания №16.1123.2017/4.6.

Список литературы

1. Axelevitch A., et. al. //Physics Procedia. 2012. V.32. P.1-13.
2. Kotlikov E.N., et. al. // Optics and Spectroscopy. 2000. V. 88(5). P. 718-720.
3. Arakelian S., et. al. // Laser Physics. 2014. V. 24(7).

А.В. КОРОЛЕВА, А.С. ИЛЬИН

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКСИДА ИНДИЯ (III) In_2O_3 , ОКСИДА ЦИНКА ZnO И ИХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Авторами были получены спектры оксида индия (III) In_2O_3 , оксида цинка ZnO и их композитов в средней ИК-области. Спектры получались на ИК-фурье-спектрометре IFS 66V фирмы Bruker Optics с разрешением 4 см^{-1} , число сканов 40. Было проведено отнесение полученных в ИК-спектрах полос поглощения для изучаемых соединений.

A.V. KOROLEVA, A.S. ILIN

Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF INDIUM (III) OXIDE In_2O_3 , ZINC OXIDE ZnO AND THEIR COMPOSITES BY IR FOURIER SPECTROSCOPY

The authors obtained spectra of indium (III) oxide In_2O_3 , zinc oxide ZnO , and their composites in the middle IR region. The spectra were obtained on IFS 66V FTIR spectrometer by Bruker Optics with resolution of 4 cm^{-1} , the number of scans was 40. The absorption bands obtained in the IR spectra for the studied compounds were assigned.

Интерес к исследованию оксида индия (III) In_2O_3 и оксида цинка ZnO обусловлен их широким использованием в различных областях. Они применяются при изготовлении фотоэлектрических устройств, УФ-защитных устройств, солнечных элементов, газовых датчиков и др.

В ИК-спектре оксида индия наблюдались полосы поглощения при $410, 536, 563, 598 \text{ см}^{-1}$, которые были отнесены к колебаниям связи In-O. Полосы при $1454, 2840, 2910 \text{ см}^{-1}$ относятся к остаткам органических соединений. Возможно, что эта органика присутствует за счет наличия в воздухе CO_2 . Полоса поглощения при 1623 см^{-1} соответствует деформационному колебанию связей O-H. Широкая полоса поглощения при 3420 см^{-1} относится к валентным колебаниям связей O-H (рис. 1).

В ИК-спектре оксида цинка имеют место полосы поглощения при $408, 453, 484, 500 \text{ см}^{-1}$, которые были отнесены к колебаниям связи Zn-O. Полосы при $870, 982, 1016, 1382, 1450, 2840, 2912 \text{ см}^{-1}$ соответствуют

остаткам органических соединений. Полоса поглощения при 1630 см^{-1} относится к деформационному колебанию связей О-Н. Полоса при 3430 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связей О-Н. Полученные результаты находятся в соответствии с результатами, полученными в предыдущих работах [1-7]. Спектр оксида цинка несколько смещен относительно спектра оксида индия в область меньших волновых чисел (рис. 2). ИК-спектры изучаемых смесей оксидов индия и цинка смещены в область меньших волновых чисел по сравнению со спектром оксида индия за счет присутствия оксида цинка.

В ИК-спектрах смесей $10\%\text{ZnO}/90\%\text{In}_2\text{O}_3$, $3\%\text{ZnO}/97\%\text{In}_2\text{O}_3$, $1\%\text{ZnO}/99\%\text{In}_2\text{O}_3$ наблюдаются полосы поглощения, соответствующие колебаниям In-O ($410, 536, 563, 598\text{ см}^{-1}$); полосы поглощения, соответствующие остаткам органических веществ, некоторые из которых оказываются смещенными по сравнению со спектрами самих веществ; а также полосы, относящиеся к деформационному и валентным колебаниям связей О-Н.

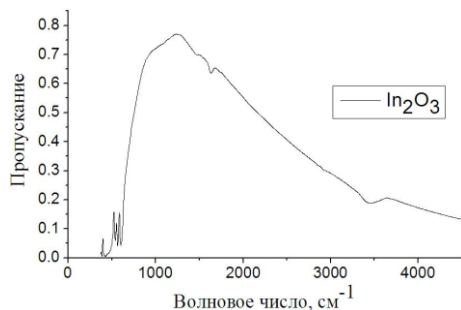


Рис. 1. ИК-спектр оксида индия

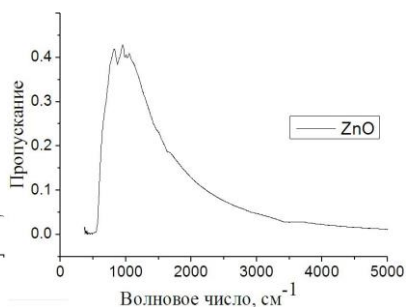


Рис. 2. ИК-спектр оксида цинка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00741 мол_а.

Список литературы

1. Rey J.F.Q., Plivelic T.S., Rocha R.A., et. al. // J. Nanopart. Res. 2005. V. 7. P. 203-208.
2. Pashchanka M., Hoffmann R.C., Gurlo A., Schneider J.J. // J. Mater. Chem. 2010. V. 20. P. 8311-8319.
3. Liu G. // Int. J. Electrochem. Sci. 2011. V. 6. P. 2162-2170.
4. Jothibas M., Manoharan C., Ramalingam S., et. al. // Spectr. Acta Part A: Mol. and Biomol. Spectr. 2014. V. 122. P. 171-178.
5. Nandi A., Majumder R., Nag P., et. al. // J. Mater. Sci: Mater Electron. 2017. V. 28. P. 10885-10892.
6. Hedayati K., et. al. // JNS. 2015. V. 5. P. 395-401.
7. Sajjad M., Ullah I., Khan M.I., et. al. // Results in Physics. 2018. V. 9. P. 1301-1309.

Ю.А. КОНИН, В.А. ЩЕРБАКОВА¹, А.И. ГАРАНИН,
Д.И. НУРМУХАМЕТОВ, С.С. СТАРИКОВ¹

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
¹Пермский государственный национальный исследовательский университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

В этой статье рассматривается чувствительность рассеивателя волоконно-оптического излучения к изменениям температуры. Рассеивающая структура внутри оптического волокна была получена с использованием эффекта катастрофического плавления оптического волокна. Была изучена температурная чувствительность волоконных рассеивателей.

Yu.A. KONIN, V.A. SHCHERBAKOVA¹, A.I. GARANIN,
D.I. NURMUHAMETOV, S.S. STARIKOV¹

*Perm National Research Polytechnic University,
¹Perm State University*

RESEARCH SENSITIVITY OF THE FIBER-OPTIC RADIATION SCATTERER TO TEMPERATURE CHANGES

This article examines the sensitivity of the fiber-optic radiation scatterer to temperature changes. The scattering structure inside the optical fiber was obtained using the catastrophic fuse effect of the optical fiber. The temperature sensitivity of the fiber diffusers was studied.

На сегодняшний день отдельным направлением волоконной оптики является разработка и исследование датчиков на основе оптических световодов. Актуальным направлением является создание датчиков в сердцевине волокна, с помощью эффекта плавления сердцевины. А также комбинирование датчика температуры с волоконным рассеивателем.

Целью данной работы является измерение температурной чувствительности рассеивающей структуры в сердцевине волокна, созданной с помощью эффекта плавления. В ходе эксперимента рассеиватель света помещался в термокамеру, в которой температура каждые 10 минут скачкообразно повышалась на 1 градус в диапазоне от 30 до 42 °С. Опрос рассеивателя производился интеррогатором с опорной бреговской решеткой. Схема установки для измерения температурной чувствительности рассеивателя показана на рис. 1.

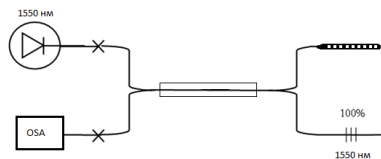


Рис. 1. Схема интеррогатора для измерения температурной чувствительности

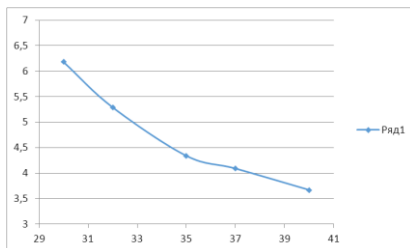


Рис. 2. Зависимость амплитуды мощности излучения обратных отражений от температуры

На рис. 2 предоставлен график зависимости мощности отражённого излучения от температуры.

Таким образом, по амплитуде мощности излучения обратных отражений можно определить температуру в месте расположения рассеивателя с точностью до 1,25 °С. В настоящей работе обоснована возможность использования волоконно-оптического рассеивателя, созданного на основе катастрофического разрушения сердцевины, как датчика температуры. В ходе исследования была выявлена зависимость амплитуды мощности излучения обратных отражений от температуры.

В результате исследования характеристик одномодового рассеивателя получен калибровочный график зависимости амплитуды мощности обратного излучения от температуры. Это доказывает, что разработанный и изготовленный рассеиватель может применяться как датчик температуры.

Список литературы

1. Bufetov I.A., Dianov E. M. Optical discharge in optical fibers // Phys. Usp. 2005, V.48. № 1. P. 91-94.
2. Kashyap R. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Proc. Xth Inter. Conf. on Lasers. Lake Tahoe, Nevada, USA, 1987. P. 859-866.
3. Kashyap R., Blow K.J. Self-propelled self-focusing damage in optical fibers // Electronics Lett. 1988. V. 24(1). P. 47-49.
4. Domingues M.F., Paixão T.B., Mesquita E.F.T., Alberto N., Frias A.R., Ferreira R.A.S., Varum H., Antunes P.F.C. Liquid Hydrostatic Pressure Optical Sensor Based on Micro-Cavity Produced by the Catastrophic Fuse Effect // IEEE Sensors Journal. 2015. V. 15. Is. 10. P. 5654-5658.
5. Hand D.P., Russell P.S.J. Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse // Opt. Lett., 1988. V. 13(9). P. 767-769.

Д.Д. СТАРЫХ^{1,2}, И.И. ШИХАЛИЕВ², О.Е. НАНИЙ^{2,3},
В.Н. ТРЕЩИКОВ²

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

²*ООО «Т8», Москва*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА НА МАКСИМАЛЬНУЮ БЕЗРЕГЕНЕРАЦИОННУЮ ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

Приведены результаты экспериментов по исследованию сверхдлинных однопролетных волоконно-оптических линий связи на различных типах волокон. Были исследованы три типа волокна: стандартное одномодовое волокно (SSMF), волокно с пониженными потерями (ULL) и волокном с пониженными потерями и увеличенным диаметром основной моды (TXF). Для трех типов волокон измерены спектры пропускания волокон, рамановские коэффициенты и нелинейные внутриканальные искажения оптического сигнала. На основании численного моделирования сверхдлинных однопролетных ВОЛС предложена оптимальная комбинация разных волокон, обеспечивающая максимальную дальность передачи.

D.D. STARYKH^{1,2}, I.I. SHIKHALIEV², O.E. NANIY^{2,3},
V.N. TRESCHIKOV²

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

²*T8 Ltd, Moscow*

³*Lomonosov Moscow State University*

EFFECT OF FIBER PARAMETERS ON MAXIMUM REACH OF FIBER OPTICAL LINKS

Presents the experimental result of investigation of ultra-long single haul fiber-optical communication link (FOCL) based on different types of fiber. We investigate three types of optical fiber: standard single mode fiber (SSMF), ultra-low-loss fiber (ULL) and fiber combines ultra-low-loss and large effective mode-field diameter (TXF). We measure spectrum of loss, effective Raman coefficient and nonlinear intra-channel distortions in three types of fibers. In according to numerical simulations we propose optimal combinations of different types of fibers to reach maximal FOCL performance.

В условиях малой плотности населения возникает задача создания сверхдлинных однопролетных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Для этой цели применяются специальные средства усиления сигнала, такие как распределенные усилители на эффекте вынужденного

комбинационного рассеяния и эрбиевые усилители с удаленной накачкой (ROPA) [1, 2], а также специализированные типы волокон.

Целью работы является экспериментальное и модельное исследование влияния параметров волокон на максимальную дальность передачи оптического сигнала. Исследованы три типа волокна: стандартное одномодовое волокно (SSMF), волокно с пониженными потерями (ULL) и волокно с пониженными потерями и увеличенным диаметром основной моды (TXF). С помощью метода дополнительных потерь измерены спектры пропускания волокон в диапазоне 1300-1700 нм. По спектру усиления слабого сигнала и спектру усиленного спонтанного рамановского рассеяния рассчитаны рамановские коэффициенты (рис. 1). Для оптического сигнала с модуляцией DP-QPSK исследовано влияние типов волокна на нелинейные искажения сигнала, при этом нелинейные искажения рассматривались как аддитивный гауссов шум [3, 4] (рис. 2).

Численное моделирование, основанное на полученных экспериментальных данных, показало, что наибольшая дальность передачи достигается при комбинировании в одной ВОЛС разных типов волокон, на высокоэнергетических участках применяется волокно TXF, а на остальных волокно ULL. Такая конфигурация позволяет передать 16-QAM (200 Гб/с) сигнал на расстояние до 470 км.

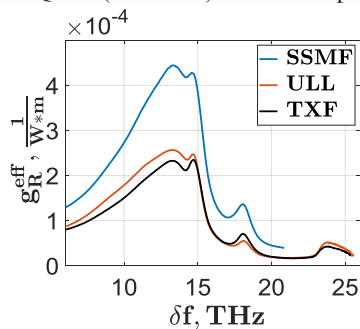


Рис. 1. Спектр эффективных рамановских коэффициентов

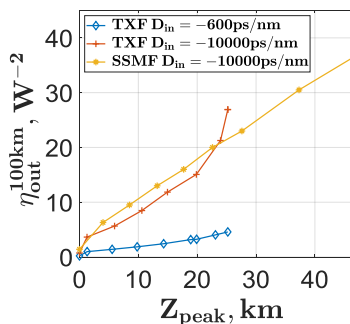


Рис. 2. Зависимость нелинейных коэффициентов от пространственного положения максимума мощности сигнала в волокне

Список литературы

1. Gainov V., et. al. // Opt. Express. 2014. V. 22. № 19. P. 22308.
2. Chang D., et. al. // Asia Communications and Photonics Conference, 2014. P. AF4B.4.
3. Poggiolini P., et. al. // J. Light. Technol. 2014. V. 32. № 4. P. 694–721.
4. Starykh D.D., et. al. // Quantum Electron. 2018. V. 48. № 8. P. 767–772.

И.В. БОГАЧКОВ

*Омский государственный технический университет***ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА В ЭРБИЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

Рассмотрены особенности характеристик рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в нескольких разновидностях оптических волокон, легированных эрбием. Проанализирована связь между величиной бриллюэновского сдвига частоты с характеристиками сердечника оптического волокна.

I.V. BOGACHKOV

*Omsk State Technical University***PECULIARITIES OF THE MANDELSTAM-BRILLOUIN SCATTERING IN ERBIUM-DOPED OPTICAL FIBERS**

The work is devoted to the researches of the Mandelstam-Brillouin scattering characteristics in several kinds of erbium-doped optical fibers. The value of Brillouin frequency shift depends on characteristics of the fiber core.

Для обнаружения участков оптических волокон (ОВ) с повышенным натяжением и изменённой температурой применяются бриллюэновские рефлектометры (BOTDR) [1, 2], в них анализируется распределение спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (СРМБ) вдоль ОВ.

Бриллюэновский сдвиг частоты (f_B) в ОВ определяется формулой

$$f_B = f_L - f_S = 2f_L v_A n_{эфф} / c = 2v_A n_{эфф} / \lambda_L \quad (1)$$

где f_L – частота (λ_L – длина волны) излучения лазера, f_S – частота стоксовой компоненты, $n_{эфф}$ – эффективный показатель преломления сердцевины, c – скорость света, v_A – скорость гипер акустической волны в ОВ [3, 4].

ОВ, легированное эрбием определенной концентрации, (EDF) применяется в эрбиевых оптических усилителях. Поскольку в BOTDR уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны, представляет особый интерес исследование СРМБ в различных типах EDF при различных уровнях мощности вводимого сигнала и изменениях температуры [1-4]. В отличие от ранее исследованного короткого отрезка EDF [1-4], в экспериментах были изучены существенно более длинные ОВ (длиной более 10 м). На рис. 1 приведены графики профиля СРМБ EDF и зависимость потерь (уровня отражённого сигнала) вдоль световода. Профиль СРМБ EDF имеет единственный максимум (f_B) на частоте

10.95 ГГц (у EDF, исследованного ранее, $f_B \approx 10.7$ ГГц, у G.652 $f_B \approx 10.8$ ГГц [1-4]). На рис. 2 приведены графики для радиационно-устойчивого EDF, легированного церием и эрбием, (CeEr008-B270418-jm-2jm-1j-1/1-8). Профиль СРМБ EDF имеет максимум (f_B) на частоте 10.39 ГГц, при этом наблюдается побочный максимум на частоте 11.1 ГГц.

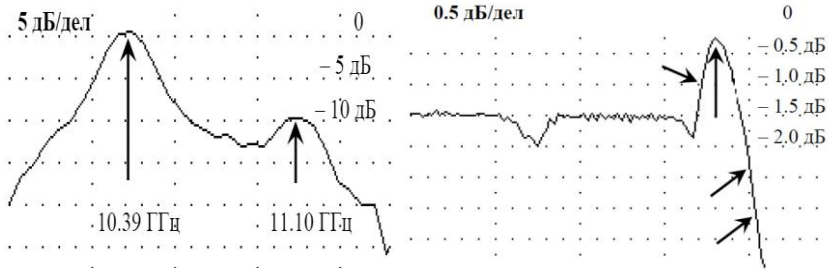


Рис. 1. Профиль СРМБ и график потерь EDF

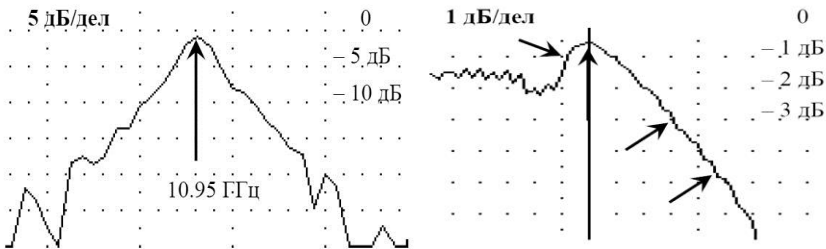


Рис. 2. Профиль СРМБ и график потерь EDF, легированного также церием

Также на графике потерь хорошо заметен подъём примерно на 3 дБ в начале EDF, но у длинных ОБ после него наблюдается стремительное падение уровня отражённого сигнала, причём следующие за EDF ОБ на рефлектограммах не видны, так как сигнал поглощается в EDF. Такие эффекты у ОБ других разновидностей не наблюдались. Исследования показали, что строение сердечника ОБ и его состав влияют на f_B и в формуле (1) необходимо использовать именно $n_{эфф}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части госзадания (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Богачков И.В. // Сб. тр. VII Межд. конф. по фотон. и инф. опт. М., 2018. С. 344-345.
2. Богачков И.В. // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 4. С. 4-8.
3. Bogachkov I.V. // T-comm. 2017. V. 11. No. 6. P. 59-63.
4. Богачков И.В., Трухина А.И. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2017. Т. 8. № 3. С. 15-18.

Т.П. ЯНУКОВИЧ, А.В. ПОЛЯКОВ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИИ

Приведены результаты математического моделирования работы распределенного оптоволоконного сенсора силы тока с использованием вынужденное рассеяние Мандельштамма-Бриллюэна, возникающее при деформации, позволяющий измерять значение силы тока в области от 1 до 25 кА, определять участок, где измерение проводится. Проведена оценка точности и пространственного разрешения сенсора.

T.P. YANUKOVICH, A.V. POLYAKOV

Belarusian State University, Minsk

NUMERICAL MODEL OF DISTRIBUTED OPTICAL FIBER SENSOR OF ELECTRIC CURRENT BASED ON DEFORMATION

Presents the result of sensor numerical model. Distributed optical fiber sensor of electric current uses stimulated Brillouin scattering, occurred in fiber under deformation. This sensor allows to measure electric current from 1 to 25 kA, and determine the spot, where deformation is determined. The estimation of accuracy is made.

Развитие автоматизации в современной промышленности становится первостепенной задачей. В связи с этим возникает большая потребность в создании автономных сенсоров различных физических величин, в частности, силы тока. Особый интерес в связи с этим вызывают оптические датчики. В настоящее время используются датчики на основе эффекта Фарадея, однако они требуют использование большой длины оптического волокна, не позволяют одновременное измерение в различных точках [1]. Кроме этого, существуют датчики на основе магнитострикции и деформации [2]. Но они могут работать только в одной точке и создать на основе этих эффектов датчик, работающий распределенно, не представляется возможным. С развитием нового класса волоконно-оптических датчиков, использующих вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, стало возможно их применение в различных областях техники. При создании таких сенсоров используется свойство

изменения характеристической частоты вынужденного рассеяния при изменении температуры и деформации волокна. Кроме этого, такие сенсоры позволяют измерять не только воздействие величины, но и ее местоположение [3-5].

Для проведения моделирования использовалось одномодовое оптическое волокно диаметром 125 мкм с оболочкой из алюминия, по которой проходит ток 1 А. Волокно расположено на расстоянии 1 см от токовой шины. В модели рассмотрены три участка волокна, длиной 0,2, 0,1 и 0,3 м [7]. Для оценки работы сенсора в разных режимах проведено моделирование для оптического волокна с оболочками из различных металлов, различной толщины и с различной силы тока. Таким образом осуществляется подбор наиболее удобной конфигурации системы, позволяющей повысить точность измерений. Произведена оценка минимальной длины чувствительного участка оптического волокна, как с точки зрения разрешающей способности измерительной системы, так и с точки зрения нелинейной деформации, возникающей в оптическом волокне под действием силы Ампера. Также в математической модели учтено изменение модуля Юнга при металлизации оптического волокна. При оценке возможных ошибок работы сенсора учтено увеличение температуры оптического волокна при прохождении тока по металлической оболочке. Математическая модель показала, что поскольку нагрев будет происходить по всему волокну. То дополнительной ошибки в измерение не внесет.

Построенная модель позволяет продемонстрировать работу сенсора, оценить его пространственное разрешение. Датчик может быть использован для измерения больших токов с точностью не менее 0,2 кА.

Список литературы

1. Григорьев М.Г., Вавилова Г.В. // Инновации в науке: сб. ст. по матер. XX междунар. науч.-практ. конф, 2013.
2. Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля. Учебное пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013.
3. Horigochi T., Tateda M. BOTDA // J. Lightwave Technology. 1989. V. 7. № 8. P. 1170.
4. Godolla T., Krebber K. // Proceedings of SPIE. 1997. V. 3105. P. 168-179.
5. Янукович Т. П. // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 7. С. 49.
6. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты». 2018. Т. 2. С. 300.
7. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства». 2018. С. 17.

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

Российский университет дружбы народов, Москва

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены температурные свойства четырёхслойного оптического волновода на основе плёнки Ta_2O_5 с поверхностным слоем из золь-гель материала – диоксида титана. Выявлены особенности дисперсионных характеристик и их зависимость от температуры, исследовано распределение мощности волноводных мод по слоям структуры. Проведена оценка возможности перекачки энергии из одного слоя в другой путём изменения температуры и определены оптимальные для этого параметры волноводной структуры.

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

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

TEMPERATURE PROPERTIES OF MULTILAYER OPTICAL WAVEGUIDES USING SOL-GEL MATERIALS

The temperature properties of a 4-layer optical waveguide based on Ta_2O_5 film with a surface layer of sol-gel material, titanium dioxide, are considered. The features of the dispersion characteristics and their dependence on temperature are revealed, the distribution of the power of the waveguide modes over the structure layers is investigated. The possibility of transferring energy from one layer to another by varying the temperature was estimated, and the parameters of the waveguide structure optimal for this were determined.

Плёнки, изготовленные по золь-гель технологии, обладают рядом интересных свойств, таких как большой термооптический коэффициент, пористость и др. [1]. Особенно перспективными представляются устройства с термоуправлением, включая температурную коррекцию их параметров и осуществление атермального режима работы. Цель работы заключалась в детальном исследовании дисперсионных свойств многослойных оптических волноводов с использованием золь-гель плёнок и их зависимости от температуры.

Была исследована четырёхслойная волноводная структура на основе диффузионного волновода. В качестве дополнительного слоя служила золь-гель плёнка диоксида титана (TiO_2) (рис. 1).

Расчёт семейства дисперсионных характеристик для TE_1 - и TM_1 - мод и двух температур ($T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = 100^\circ\text{C}$) был проведён с использованием метода формул сдвига [2], который отличается экономичностью и позволяет анализировать волноводные структуры с любым распределением показателя преломления. При расчёте была учтена зависимость показателя преломления от температуры. Особенность дисперсионных характеристик четырёхслойного волновода состоит в том, что при определённой толщине золь-гель плёнки происходит трансформация дисперсионных кривых, на которых появляются перегибы, между которыми лежит горизонтальный участок. Эти особенности связаны с перераспределением мощности излучения по слоям структуры. Зависимости мощности излучения, распространяющегося по дополнительному слою четырёхслойного волновода от толщины этого слоя при различных показателях преломления, приведены на рис. 2, из которого видно, что при $n_2 = 1,6$ кривая достигает максимума, а затем опускается вниз, что свидетельствует о перекачке мощности из одного слоя в другой. Отрицательный термооптический коэффициент золь-гель плёнки вносит изменение в распределение мощности излучения по слоям при изменении температуры, что может быть использовано для дозируемой перекачки мощности путём температурной регулировки параметров волноводной системы.

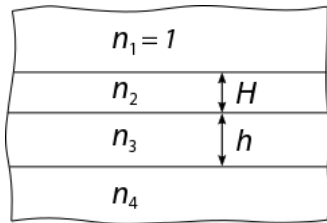


Рис. 1. Структура четырёхслойного волновода: 1 - воздух; 2 - золь-гель плёнка ($n_2 = 1,46-1,80$); 3 - диффузионный слой ($n_3 = 1,515-1,600$); 4 - подложка ($n_4 = 1,514$)

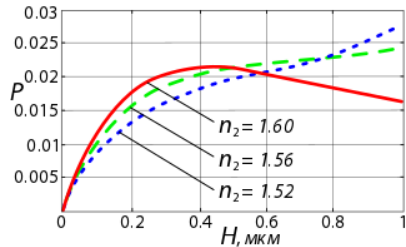


Рис. 2. Зависимость мощности P излучения, распространяющегося по дополнительному слою четырёхслойного волновода от толщины H и разных показателях преломления n_2 этого слоя

Список литературы

1. Грабовский Е.И., Живцов С.В., Чехлова Т.К. Температурная зависимость золь-гель волноводов // РЭ. 2006. Т. 51. № 7. С. 855-861.
2. Николаев Н.Э., Шевченко В.В. Метод формул сдвига в применении к заглублённым планарным оптическим волноводам // РЭ. 1997. Т. 42. № 8. С. 901-903.

М.Е. ПОПОВ, Н.В. МИТЕТЕЛО, Е.А. МАМОНОВ,
К.Д. ЖДАНОВА, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Приведены результаты исследований многофотонных процессов в микростержнях, полученных из органического соединения Binol в результате процесса самоорганизации, происходящих при воздействии на структуру мощного фемтосекундного излучения накачки. Показано, что данные структуры могут быть использованы в качестве активных волноводов.

М.Е. POPOV, N.V. MITETELO, E.A. MAMONOV,
K.D. ZHDANOVA, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

NONLINEAR-OPTICAL MICROSCOPY OF ORGANIC WAVEGUIDES

The results of the studies of multi-photon processes in microrods, which were fabricated from the organic compound Binol as a result of self-assembly process, under intense femtosecond pump radiation are shown. It is shown that these structures can be used as active waveguides.

В прошедшие десятилетия диэлектрические микроstructures активно изучались с целью использования их в устройствах фотоники. В отличие от неорганических структур, свойствами органических, такими как форма, размер и показатель преломления, можно достаточно просто управлять в широком диапазоне. Известно, что структуры в форме микроstержней могут проявлять как свойства резонатора Фабри-Перо [1], так и волноводные [2] свойства.

В данной работе были изучены активные волноводные свойства микроstержней, изготовленных из хирального органического соединения R-Binol методом самоорганизации [3], в двух- и трехфотонном нелинейно-оптическом отклике с использованием фемтосекундных титан-сапфирового (длина волны 760 нм) и иттербиевого (длина волны 1050 нм) лазеров в качестве излучения накачки в схеме многофотонной микроскопии. Получены зависимости интенсивности второй гармоники, а также двух- (ДФЛ) и трехфотонной (ТФЛ) люминесценции от расстояния

между точками возбуждения и сбора при двух различных круговых поляризациях пучка накачки (рис. 1). Измеренные коэффициенты волноводного затухания для двухфотонной и трехфотонной люминесценции составляли 0,14 и 0,22 дБ / мкм, соответственно. Кроме того в исследуемых структурах был обнаружен эффект нелинейного кругового дихроизма, величина которого составила до 11 %.

Полученные в данной работе результаты (рис. 2) могут быть использованы для создания новых функциональных элементов для приложений фотоники, таких как активные микромасштабные волноводы.

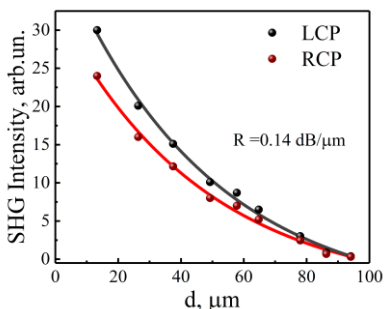


Рис. 1. Зависимость интенсивности прошедшей второй гармоники от расстояния между точками возбуждения и сбора

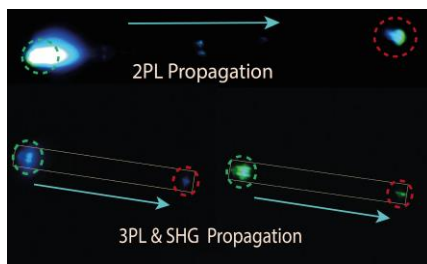


Рис. 2. Фотография распространения нелинейно-оптического сигнала второй гармоники, двух- и трехфотонной люминесценции вдоль микрострейня

Список литературы

1. Городецкий М.Л. Основы теории органических микрорезонаторов. М.: МГУ, 2010.
2. Takazawa K., Kitahama Y., Kimura Y., Kido G. Optical waveguide self-assembled from organic dye molecules in solution // Nano letters. 2005. V. 5. No. 7. P. 1293-1296.
3. Venkatakrishnarao D., et. al. Chiral organic photonics: self-assembled micro-resonators for an enhanced circular dichroism effect in the non-linear optical signal // Journal of Materials Chemistry C. 2017. 5.47. P. 12349-12353.

В.В. ЮШКЕВИЧ, А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ,
Н.В. ДИДЕНКО¹

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Представлена модернизированная фемтосекундная лазерная установка с перестройкой длины волны, основанная на параметрической генерации и усилении света. Описаны принцип действия и оптическая схема параметрического усилителя, обсуждаются возможные применения установки.

V.V. YUSHKEVICH, A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKII,
N.V. DIDENKO¹

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

FEMTOSECOND OPTICAL PARAMETRIC AMPLIFIER FOR LASER DIAGNOSTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES

The wavelength tunable femtosecond laser facility based on parametric light generation and amplification is presented. The principle of operation and optical scheme of the parametric amplifier are described; the possible applications are discussed.

Фемтосекундное (ФС) лазерное излучение широко используется для возбуждения и зондирования быстротекущих электрических процессов в полупроводниковых микроэлектронных структурах (МС). Выбор длины волны лазерного излучения зависит от типа и степени легирования полупроводника, а также от геометрии облучения (со стороны активного слоя или со стороны подложки). Для диагностики сбоев и отказов в кремниевых МС сравнительно малой степени интеграции активно используется ФС лазерная установка [1] на основе титан-сапфира с рабочей длиной волны $\lambda = 870$ нм. Однако, появление в последние годы МС высокой степени интеграции, оптический доступ к кристаллам которых со стороны активных областей затруднен или невозможен, делает необходимым использование других длин волн,

эффективных при облучении МС со стороны подложки. С этой целью ФС установка была дооснащена оптическим параметрическим усилителем.

Работа усилителя основана на параметрической генерации с последующем параметрическим усилением в нелинейных кристаллах короткого лазерного импульса, предварительно преобразованного в белый свет (континуум) и растянутого во времени в дисперсионной среде [2].

Для получения перестроенного по длине волны излучения ($\lambda = 900 \dots 1200$ нм) используется излучение ФС лазера ($\lambda = 870$ нм), разделяемое на два канала (рис. 1): в одном в кристалле сапфира генерируется континуум, а в другом – преобразуется в излучение второй гармоники ($\lambda = 435$ нм), используемое для накачки нелинейных кристаллов НК₁ и НК₂ двух каскадов параметрического усиления.

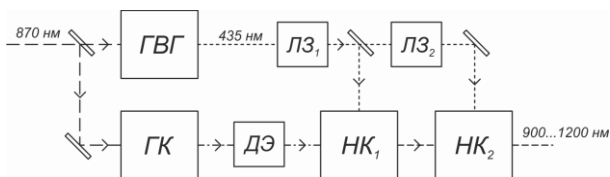


Рис. 1. Схема оптического параметрического усилителя

Дисперсионный элемент ДЭ обеспечивает «растягивание» короткого импульса за счет дисперсии групповых скоростей компонент спектра континуума. При подборе угла поворота НК₁ и положения линии задержки ЛЗ₁ импульса накачки в кристалле НК₁ обеспечивается фазовый синхронизм и эффективно усиливается та часть растянутого (чирпированного) импульса континуума, которая совпадает в пространстве и во времени с импульсом накачки. Аналогично, подбором угла и задержки накачки ЛЗ₂ в кристалле НК₂, обеспечивается эффективное усиление сигнальной волны, полученной в нелинейном кристалле первого каскада. Созданная перестраиваемая ФС установка в настоящее время применяется для моделирование одиночных радиационных эффектов в МС, возникающих при воздействии на них высокоэнергетичных заряженных частиц.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках «Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ».

Список литературы

1. Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavrtskiy O.B., et. al. // IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW) Record. 2014. P. 247-250.
2. Didenko N.V., Konyashchenko A.V., Losev L.L., et. al. // Optics Communications. 2009. V. 282(5). P. 997-999.

Е.С. ЛОТКОВ^{1,2}, А.С. БАБУРИН^{1,2}, И.А. РЫЖИКОВ^{1,3},
И.А. РОДИОНОВ^{1,2}, Ю.В. ПАНФИЛОВ¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

³Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва

ОСАЖДЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ИТО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ИСПАРЕНИЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТНИКЕ

В настоящее время большое внимание уделяется поиску решений для создания высокоскоростных оптических модуляторов. Одной из перспективных реализаций является изготовление модулятора на основе перестраивания показателя преломления в прозрачных проводящих оксидах, в том числе в оксиде индия олова (ИТО). В данной работе были получены и исследованы образцы со сплошным слоем ИТО толщиной 20 нм, концентрацией носителей $2.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Моделирование электро-оптического эффекта данной пленки в гибридном волноводе показало, что она может использоваться для модуляции света в интегрированных активных элементах.

E.S. LOTKOV^{1,2}, A.S. BABURIN^{1,2}, I.A. RYZHIKOV^{1,3},
I.A. RODIONOV^{1,2}, Yu.V. PANFILOV¹

¹Bauman Moscow State Technical University

²N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

³Institute for Theoretical and Applied Electrodynamics of the RAS, Moscow

DEPOSITION OF ULTRATHIN ITO FILMS BY ELECTRON BEAM EVAPORATION FOR INTEGRATED INFRARED PHOTONICS

At present, much attention is paid to find solutions for manufacturing high-speed optical modulators. One of the promising implementations is the manufacture of a modulator based on the tunable refractive index in transparent conducting oxides, for example indium tin oxide (ITO). In this article, continuous ITO films with a thickness of 20 nm and a carrier concentration of $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ were deposited. Simulation of the electro-optical effect of this film in a hybrid MOS waveguide has shown that it can be used to modulate light in integrated active elements.

Применение ИТО для модуляции света возможно благодаря зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения от

концентрации носителей. Эта зависимость определяется моделью Друде-Лоренца [1]. Активный элемент модулятора представляет собой МОП-структуру (Au/SiO₂/ITO), где из-за полевого эффекта в сверхтонком слое ITO скапливаются электроны, что изменяет коэффициент поглощения и показатель преломления материала [2]. Для реализации данного эффекта необходимо, чтобы свет почти полностью локализовался в виде плазмона в аккумулирующем слое. Моделирование распространения света позволило установить, что использование сплошной пленки ITO толщиной менее чем 25 нм позволяет осуществлять модуляцию.

Осаждение тонких пленок проводилось методом электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) гранул ITO (In₂O₃ – 90 %, SnO – 10 %) на подложки из кремния и кварца, очищенные в растворе H₂O₂:H₂SO₄. Базовое давление процесса составляло 10⁻⁷ Торр. Процесс осаждения проводился с ионным ассистированием с потоком кислорода 8 ст. см³ и ускоряющим напряжением 70 В. Скорость осаждения контролировалась с помощью кварцевого датчика и варьировалась от 1 до 5 Å/с. Для получения нужной проводимости пленки проводился последующий отжиг в атмосфере аргона в течении 20 минут при температуре 350 °С.

Образцы исследовались электронной микроскопией. Толщина пленок составила 21±1 нм. Их среднегеометрическая шероховатость, измеренная методом стилусной профилометрии составила от 0.8 до 1.3 нм. Восстановленные из измерения эллипсометрии показатель преломления пленки и коэффициент поглощения представлены на рис. 1.

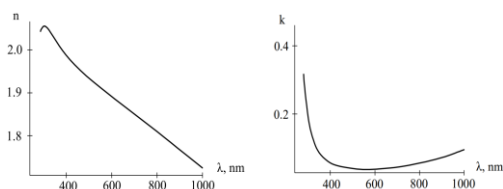


Рис. 1. Динамика n и k полученного ITO

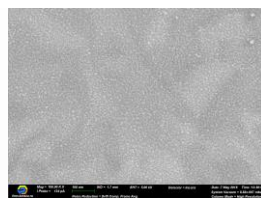


Рис. 2. Снимок СЭМ

Получен слой ITO (рис. 2) толщиной 20 нм с концентрацией носителей $2.5 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Расчет коэффициента пропускания показал, что такой слой обеспечивает коэффициент экстинкции 0.87 дБ/мкм, что соответствует уровню ведущих оптических модуляторов [2, 3].

Список литературы

1. Cleary J.W., Smith E.M., et. al. // Opt. Mater. Exp. 2018. V. 8. P. 1231-1245.
2. Sorger V.J., Lanzillotti-Kimura N.D. // Nanophoton, 2012. V. 1. P. 17-22.
3. Li E., Gao Q., et. al. // Nano Lett. 2018. V. 18. P. 1075-1081.

Б.И. ШАПИРО, А.Д. НЕКРАСОВ, Н.Е. МИНИНА
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва
Институт тонких химических технологий

СИНТЕЗ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСНЫХ АГРЕГАТОВ АНИОННЫХ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ НА ПРОЗРАЧНЫХ ИТО-ЭЛЕКТРОДАХ

Разработан электрохимический метод синтеза фоточувствительных слоёв металлокомплексов анионных полиметиновых красителей на прозрачных ИТО-электродах посредством электрохимического осаждения на поверхности ИТО-электродов слоя металла с последующей его электрохимической конверсией в слой металлокомплексных J-агрегатов анионных красителей. Установлено, что полученные слои металлокомплексов красителей обладают узкими максимумами экситонного оптического поглощения с оптической плотностью $\sim 2,0$ и показывают внешнюю квантовую эффективность фотопроводимости $\sim 5-7$ %.

B.I. SHAPIRO, A.D. NEKRASOV, N.E. MININA
MIREA – Russian Technological University, Moscow
Institute of Fine Chemical Technologies

SYNTHESIS OF LIGHT-SENSITIVE LAYERS OF METALOCOMPLEXIC AGGREGATES OF ANIONIC POLYMETHINE DYES ON TRANSPARENT ITO-ELECTRODES

Electrochemical method has been developed for the synthesis of light-sensitive layers of metal complexes of anionic polymethine dyes on the ITO-electrodes by electrochemical deposition of a metal layer on the surface of ITO-electrodes with subsequent electrochemical conversion into a layer of metallocomplexic J-aggregates of the anionic dyes. It is established that the obtained layers of metal complexes of dyes with narrow optics with a density of ~ 2 and show the external quantum efficiency of photoconductivity $\sim 5-7$ %.

Важной проблемой развивающейся органической электроники является создание надежного электрического контакта между металлическим электродом и органическим фотополупроводником. В настоящее время в качестве фоточувствительных органических материалов существенный интерес вызывают тонкие слои на основе высокоупорядоченных молекулярных агрегатов полиметиновых

красителей, отличающихся максимально высоким коэффициентом молярной экстинкции [1]. Для J-агрегатов полиметиновых красителей характерен максимальный квантовый выход генерации экситонов Френкеля, приближающийся к единице [1]. Термодинамические исследования [2] процессов сборки J-агрегатов анионных полиметиновых красителей под действием многозарядных катионов металлов свидетельствуют об уменьшении энтальпии и энтропии образования агрегатов, что свидетельствует об образовании высокоупорядоченных металлокомплексных J-агрегатов. В работе [3] продемонстрирована возможность электрохимического синтеза металлокомплексных агрегатов анионных красителей на поверхности металлических анодов.

В работе было исследовано два красителя: 3,3'-ди-(γ -сульфопропил)-4,5,4',5'-дибензотиамометинцианин и 3,3'-ди-(γ -сульфопропил)-9-фенил-4,5,4',5'-дибензотиатриметинцианин, J-агрегаты которых имеют максимумы поглощения в синей (492 нм) и красной (682 нм) области спектра, соответственно. В качестве прозрачного электрода применяли стеклянные пластинки с электропроводящим прозрачным слоем ИТО (смесь оксидов индия и олова), на поверхность которого электрохимическим способом предварительно был осажден тонкий слой металла (цинка, кадмия или меди).

Слои металлокомплексных J-агрегатов красителей были синтезированы электрохимической конверсией слоя металла на поверхности ИТО-электродов посредством комплексообразования между образующимися при окислении слоя металла катионами металла и анионными красителями. Полученные слои обладают узкими пиками экситонного поглощения в синей или красной области спектра с оптической плотностью около 2,0 и квантовой эффективностью фотопроводимости в экситонных максимумах 5 - 7 % при напряжении 5 В. Сделан вывод, что электрохимический метод получения светочувствительных слоев металлокомплексных J-агрегатов красителей на поверхности прозрачных ИТО-электродов имеет технологические перспективы для создания фотоэлементов в органической электронике.

Список литературы

1. Шапиро Б.И. // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 5. С. 484-510.
2. Некрасов А.Д., Шапиро Б.И. // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 2. С. 162-168.
3. Шапиро Б.И. и др. // Российские нанотехнологии. 2017. Т. 12. № 3-4. С. 132-138.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР,
Д.Р. ХАЗВАЛИЕВА¹

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ НА СЛОЯХ БИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Показана возможность создания на тонких слоях бихромированного желатина (БХЖ) дифракционных решеток частотой порядка 1500 мм^{-1} , при получении которых используется облучение образцов коротковолновым УФ-излучением. Достигнута дифракционная эффективность (ДЭ) в первом порядке дифракции в районе 30 %.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A. MAURER,
D.R. KHAZVALIEVA¹

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹Peter the Great Polytechnic University, Saint-Petersburg*

HIGH FREQUENCY HOLOGRAPHIC GRATINGS ON LAYERS OF DICHROMATED GELATIN USING IN THE PROCESSING OF UV-RADIATION

Creation of diffraction gratings with a frequency of about 1500 мм^{-1} on thin layers of dichromated gelatin (DCG) is shown. In the preparation of gratings short-wave UV-radiation is used. The diffraction efficiency (DE) in the first order of diffraction is about 30 %.

Ранее был обнаружен эффект разрушающего воздействия коротковолнового УФ-излучения на желатин в слоях БХЖ, который приводит к десятикратному увеличению высоты поверхностного рельефа h зарегистрированных на БХЖ голографических решеток частотой 10^3 мм^{-1} [1, 2]. Расширение сферы применения данных рельефных структур возможно при увеличении пространственной частоты, поскольку решетки частотой $\nu \geq 1000 \text{ мм}^{-1}$ применяются в качестве антиотражающих поверхностей, фильтров, поляризационных элементов, модуляторов и т.д. [3]. В то же время было получено [4], что содержащие желатин регистрирующие среды для голографии имеют ограничения по передаче пространственно-частотного спектра в области высоких частот

$v \geq 200 \text{ мм}^{-1}$, что теоретически объяснимо сглаживающим воздействием сил поверхностного натяжения, возникающих во влажном слое.

Возникает вопрос, каких значений связанной с высотой поверхностного рельефа h дифракционной эффективности η_1 можно достичь на высоких пространственных частотах при регистрации решеток на слоях БХЖ. Для ответа этот вопрос осуществлялась запись голографических решеток частотой 1500 мм^{-1} , для чего была создана специальная компактная голографическая установка с повышенными требованиями виброустойчивости и малой зависимостью от изменений температуры.

Слои БХЖ изготавливались в лабораторных условиях подобно известному способу [5]. После экспонирования сухого слоя БХЖ He-Cd лазером образцы решеток обрабатывались купанием в двухпроцентном растворе сульфата натрия в течение шести минут для завершения процессов дубления желатина и удаления соединений хрома из слоя. Далее решетки засвечивались УФ-излучением длиной волны менее 250-270 нм с помощью ртутно-кварцевой лампы высокого давления ДРТ-220 и обрабатывались согласно [1, 2]. Фотостимулированная деструкция желатина является основным механизмом образования поверхностного рельефа под действием коротковолнового УФ-излучения [1].

Измерение ДЭ решеток проводилось при считывании светом He-Ne лазера до и после засветки ультрафиолетом. До облучения УФ-светом дифракция на решетках носила Брэгговский характер (наличие нулевого и плюс первого порядков). ДЭ в первом порядке η_1 составила 0,34 % на слое БХЖ с первоначальной толщиной около 3,5 мкм. После облучения УФ-светом в течение 24 минут дифракция изменяла характер на дифракцию Рамана-Ната (наличие обоих первых порядков дифракции). Величина ДЭ η_1 составила 1,73 %. Изменение временного режима обработки слоев после УФ-облучения и включение в нее на последнем этапе купания образцов в чистом изопропанолe привело к существенному увеличению ДЭ решеток до 30 % (первоначальная толщина слоя была около 4,7 мкм).

Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 19. С. 26-30.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 9. С. 1-5.
3. Michihisa O. // PhD dissertation. College of optical sciences, Arizona, 2011.
4. Гуляев С.Н. // Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб: СПб ГПУ, 2005.
5. Shankoff T.A. // Appl. Opt. 1968. V. 7. P. 2101-2105.

И.С. ПИЧУГИН, А.И. ИГНАТЬЕВ, К.В. ОРЕШКИНА,
Н.В. НИКОНОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**МОДИФИКАЦИЯ МАТРИЦЫ
ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА:
ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**

Представлены результаты исследования влияния различных оксидов металлов на спектральные, оптические и физико-химические свойства фототерморепрактивных стекол и стеклокерамик на их основе.

I.S. PICHUGIN, A.I. IGNATIEV, K.V. ORESHKINA,
N.V. NIKONOROV

ITMO University, Saint-Petersburg

**MODIFICATION OF PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS
MATRIX: TECHNOLOGY, PROPERTIES, APPLICATIONS**

The results of an influence of different metal oxides on the spectral, optical, physical and chemical properties of photo-thermo-refractive glasses and glass-ceramics based on them are presented.

Фототерморепрактивные (ФТР) стекла – это особый класс фоточувствительных неорганических материалов, которые созданы для записи высокоэффективных термостабильных объемных брэгговских решеток. Изменение показателя преломления в ФТР-стекле происходит за счет процесса фототермоиндуцированной (ФТИ) кристаллизации: под воздействием УФ-облучения и последующей термообработки выше температуры стеклования в облученной области объема стекла образуется наноразмерная кристаллическая фаза NaF, показатель преломления которой отличается от показателя преломления необлученной области [1]. Данный эффект используется для создания голографических оптических элементов. Голограммы на ФТР-стекле обладают рядом серьезных преимуществ: высокой дифракционной эффективностью, долгим сроком хранения, высокой химической, механической и термической прочностью.

Основополагающей характеристикой ФТР-стекла является изменение показателя преломления (Δn) между облученной и необлученной областями. Согласно приближению Максвелла-Гарнетта эффективная

диэлектрическая проницаемость среды с включениями описывается следующим выражением (1) [2, 3]:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \frac{2\delta_i(\varepsilon_i - \varepsilon_m) + \varepsilon_i + 2\varepsilon_m}{2\varepsilon_m + \varepsilon_i + \delta_i(\varepsilon_m - \varepsilon_i)}, \quad (1)$$

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 натриевоцинкалюмосиликатной системы ($\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaBr}$), содержащие в составе CeO_2 , Sb_2O_3 и Ag_2O , с частичной заменой SiO_2 на PbO , BaO , Bi_2O_3 , La_2O_3 , Y_2O_3 , In_2O_3 , GeO_2 , ZrO_2 , HfO_2 , Nb_2O_5 и Ta_2O_5 . Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температурах от 1440 до 1560 °С в зависимости от состава в кварцевых тиглях. Мешка осуществлялась платиновой мешалкой. Температура стеклования определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и составила от 426 до 671 °С в зависимости от состава. Полученные образцы облучались УФ-излучением ртутной лампы и обрабатывались в градиентной печи при температурах от 400 до 700 °С. Спектры поглощения измерялись на спектрофотометре Lambda 650. Показатели преломления измерялись на рефрактометре Аббе ИРФ-454.

В работе было показано, что введение оксидов металлов с высокими парциальными показателями преломления в ФТР-стекло сильно увеличивают его показатель преломления от 1,49 до 1,66 в зависимости от состава. Также было исследовано влияние данных оксидов на механизмы спонтанной и фототермоиндуцированной кристаллизации ФТР-стекла. В работе показано, что введение некоторых из представленных оксидов приводит к отсутствию классической фотохимии и фототермоиндуцированной кристаллизации в ФТР-стекле. Исследованы спектральные свойства данных стекол на всех этапах эксперимента.

Список литературы

1. Ivanov S.A., Ignatiev A.I., Nikonov N.V. // Proc SPIE. 2015. V. 9508. P. 95080E.
2. Levy O., Stroud D. // Physical Review B. 1997. V. 56(13). P. 8035.
3. Liu T., Pang Y., Zhu M., Kobayashi S. // Nanoscale. 2014. V. 6.4. P. 2447-2454.

Д.В. КУЗЬМИН, В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, С.Б. ОДИНОКОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТР-СТЕКЛОЛ ПРИ ЗАПИСИ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИМПУЛЬСНЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ
БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Приведены результаты экспериментов по исследованию экспозиционной характеристики ФТР-стеклол при записи голографических и дифракционных элементов импульсным фемтосекундным лазером ближнего ИК-диапазона.

D.V. KUZMIN, V.Yu. ZHELEZNOV, S.B. ODINOKOV
Bauman Moscow State Technical University

**INVESTIGATION OF THE EXPOSURE CHARACTERISTICS
OF PHOTO-THERMO- REFRACTIVE GLASSES
IN THE PROCESS OF RECORDING OF HOLOGRAPHIC
AND DIFFRACTION ELEMENTS BY A PULSES
FEMTOSECOND LASER IN THE NEAR-INFRARED RANGE**

There are the results of experiments on the investigation of the exposure characteristics of the PTR glasses under recording holographic and diffraction elements by a near-infrared femtosecond laser pulses of a diapason.

Фототерморелрактивные (ФТР) стекла уже давно хорошо зарекомендовали себя для применения в голографии. На основе (классических) ФТР-стеклол изготавливаются голографические дифракционные оптические элементы, которые можно использовать в системах оптической связи, системах записи, хранения и обработки информации. Классические ФТР-стекла и оптические элементы на их основе имеют следующие достоинства: высокий прирост показателя преломления ($\Delta n \approx 5 \cdot 10^{-4}$), высокая дифракционная эффективность (до 95 %), большая толщина голограммы (несколько мм), неограниченный срок хранения голограммы (десятки лет), высокая термическая, механическая и оптическая прочность (эти характеристики близки к промышленному оптическому стеклу К8).

В основе записи голограммы лежит двухступенчатый процесс фототермоиндуцированной кристаллизации стекла. На первом этапе производится запись интерференционной картины ультрафиолетовым лазером $\lambda = 325$ нм, длина волны излучения которого близка к полосе поглощения Ce_3^+ ($\lambda_{\text{max}} \approx 310$ нм). Световой пучок может быть пространственно модулирован (цифровыми данными), как в случае двухлучевой голографии или проекционной схемы, в случае поэлементной записи пучок фокусируется до необходимых размеров. На втором этапе повышение температуры (до 500 °С) ведет сначала к росту на коллоидных частицах серебра оболочки из AgBr и NaBr и затем к росту на этой структуре кристаллической фазы NaF . Изменение показателя преломления ФТР-стекла составляет $\Delta n = 9,7 \cdot 10^{-4}$ при экспозиции 2 Дж/см². В этом случае голограмма записывается по всей толщине стекла. Запись же оптического элемента в тонком слое стекла происходит с помощью фемтосекундных импульсов ближнего ИК-диапазона (рис. 1).

Целью работы является исследование экспозиционной характеристики ФТР-стекол при записи голографических и дифракционных элементов в тонком слое стекла импульсным фемтосекундным лазером. В экспериментах использовался фемтосекундный лазер с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 200 фс. Полученная зависимость дифракционной эффективности от величины экспозиции приведена на рис. 2.

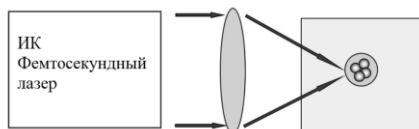


Рис. 1. Схема записи фемтосекундным лазером

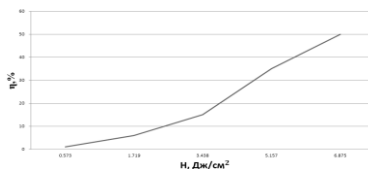


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции

Список литературы

1. Иванов С.А. и др. Голографические характеристики модифицированного фототермопрефрактивного стекла. // Оптический журнал. 2014. № 6.
2. Glebov L.B., Nikonov N.V., Panysheva E.I., et. al. New Possibilities of Photosensitive Glasses for the Recording of Volume Phase Diagrams // Opt Spektros. 1992. V. 73(2). P. 404-412.
3. Glebov, L. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements // 2007. V. 6545. P. 1-9.
4. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В.А. Голографические характеристики модифицированного фототермопрефрактивного стекла // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 6. С. 72-77.

Т. АЛИЕВА, Х.А. РОДРИГО, М. АНГУЛО
Мадридский университет Комплутенсе, Испания

ПОЛИМОРФИЧЕСКИЙ ПУЧОК КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИЧЕСКОЙ МАНИПУЛЯЦИИ НА УРОВНЕ МИКРОМИРА

Недавно введенная концепция полиморфического пучка позволяет создавать при помощи лазера дифракционно ограниченные 3D-контурные с произвольным распределением фаз по данному контуру. Принцип построения светового контура основан на теории спиральных пучков. Однако ключевые свойства сфокусированного полиморфического пучка, такие как значительные градиенты интенсивности и управляемые градиенты фазы, независимые от формы и размеров контура, делают его многофункциональным инструментом для различных технологических применений. В работе рассматривается конструкция скалярных и векторных полиморфических пучков и обсуждаются экспериментальные результаты по их применению для оптических манипуляций микро- и наночастиц.

T. ALIEVA, J.A. RODRIGO, M. ANGULO
Complutense University of Madrid, Spain

POLYMORPHIC BEAM AS A TOOL FOR OPTICAL MANIPULATION IN MICROWORLD

The recently introduced concept of polymorphic beam allows for the creation of diffraction limited laser curves of arbitrary 3D shape with free design of the phase distribution along the curve according to the considered application. The construction principle of the light curve is inspired by the spiral beam. However it is the key properties of the focused polymorphic beam, such as high intensity gradients and phase gradient control independent on the curve shape and size, that makes it a multi-functional tool of high technological interest. The design of the scalar and vector polymorphic beams and their main applications for optical manipulation of micro/nano-particles are discussed, including experimental results.

Применение компьютерно-синтезированных голограмм для создания пучков значительно расширило возможности оптического захвата. Временное мультиплексирование, как и однолучевые методы, позволяют не только удерживать микро- и наночастицы в определенной области, но и перемещать их по заданной траектории. В данной работе рассмотрено построение однолучевой полностью оптической ловушки, пригодной для программируемого переноса микро- и наночастиц. Основные требования к данному лучу: произвольный выбор формы светового контура; значительные 3D-градиенты интенсивности для полностью оптического

захвата (без помощи интерфейса); контроль фазовых градиентов вдоль контура (независимо от его формы и размера), подходящий для передвижения частицы с желаемой скоростью; неитеративные методы быстрого создания луча и изменения траектории. В [1] и [2] были получены выражения для подобных полиморфических преобразований пучка при фокусировке в 2D и 3D-контуры соответственно. Хотя за основу метода построения световых контуров взят метод, описанный в [3], свойства полиморфических и спиральных пучков полностью различны, что не удивительно, так как различаются цели их создания. Для удовлетворения вышеперечисленных требований был использован метод разложения плоских волн. В отдельных случаях полиморфический пучок сводится к хорошо известным недифракционным пучкам Бесселя.

На рис. 1 показан перенос частиц кремния размером 1 мкм по 3D-траектории, созданной за счёт полиморфической фокусировки пучка ($\lambda = 532$ нм). На некоторых участках траектории частицы движутся против направления распространения пучка за счёт особой конструкции сил градиента фазы [2, 4]. Ловушка создавалась на глубине образца 25 мкм.

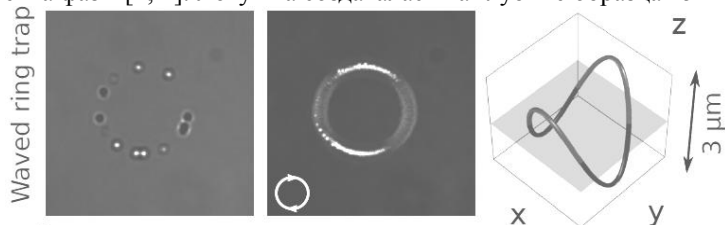


Рис. 1. Оптически индуцированное движение частиц в 3D волновой кольцевой ловушке (слева и в центре); закольцованное по времени движение частиц, демонстрирующее форму ловушки (справа)

Полиморфические пучки также использовались для перемещения плазмонных наночастиц [5] и живых бактерий. Недавно понятие полиморфического пучка обобщено до векторного полиморфического пучка [6], что, в частности, позволяет создавать 2D световые контуры с линейной поляризацией вдоль или перпендикулярно профилю контура.

Список литературы

1. Rodrigo J.A., Alieva T. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 35341.
2. Rodrigo A.J., Angulo M., Alieva T. // Opt. Express. 2018. V. 26. P. 18608.
3. Abramochkin E.G., Volostnikov V. G. // UFN. 2004. V. 174. P. 1273.
4. Rodrigo J.A., Alieva T. // Optica. 2015. V. 2. P. 812.
5. Rodrigo J. A., Alieva T. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 33729.
6. Rodrigo J. A., Alieva T. // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 7698.

А.Л. ТОЛСТИК, Е.А. МЕЛЬНИКОВА, Д.В. ГОРБАЧ,
М.В. БОБКОВА, В.В. ПЕКАРЕВИЧ

Белорусский государственный университет, Минск

**ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ДИНАМИЧЕСКИМИ
ГОЛОГРАММАМИ И ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

Рассмотрены методы управления фазово-поляризационной структурой гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков при поляризационной записи динамических голограмм, а также с использованием электрически управляемых жидкокристаллических элементов. Показана возможность реализации спин-орбитального взаимодействия, а также формирования световых пучков с заданной фазовой и поляризационной структурой, включая пучки с радиальной и азимутальной поляризацией.

A.L. TOLSTIK, E.A. MELNIKOVA, D.V. GORBACH,
M.V. BOBKOVA, V.V. PEKAREVICH

Belarusian State University, Minsk

**PHASE-POLARIZATION TRANSFORMATION
OF LIGHT BEAMS BY DYNAMIC HOLOGRAMS
AND LIQUID-CRYSTAL ELEMENTS**

The control methods for the phase-polarization structure of Gaussian, Bessel, and singular light beams on polarization recording of dynamic holograms and with the use of the electrically controlled liquid-crystal elements have been considered. The possibility for realization of the spin-orbit interactions and for the formation of light beams with the desired phase and polarization structure, beams with radial and azimuthal polarization including, has been demonstrated.

Интерес к фазово-поляризационным преобразованиям световых полей определяется возможностью создания пучков с особыми свойствами (сингулярные и бесселевы пучки, вращающиеся и спиральные световые поля и др.). Такие преобразования реализуются либо при использовании пространственно структурированной анизотропной среды, например, формируемой при поляризационной записи динамических голограмм [1], либо при использовании пространственно структурированных световых пучков и их распространении в анизотропных средах [2].

В настоящей работе рассмотрены методы фазово-поляризационного преобразования гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков на основе поляризационной голографической записи, а также с использованием жидкокристаллических (ЖК) элементов.

Проанализированы схемы поляризационной записи сингулярных динамических голограмм волнами с ортогональными линейными или круговыми поляризациями, когда формирование анизотропной структуры в нелинейной среде обусловлено пространственной модуляцией поляризации света в соответствии с разностью фаз записывающих голограмму волн [3]. Дифракция излучения на такой структуре приводит к изменению состояния поляризации световой волны, а также его топологического заряда. Определены условия мультиплицирования заряда сингулярного пучка, а также основные закономерности изменения его поляризации при дифракции в четные и нечетные порядки.

Для формирования световых пучков с заданной фазово-поляризационной структурой перспективно использование ЖК-элементов [4]. Предложены две топологии пространственной ориентации директора ЖК, позволяющие преобразовать линейно поляризованный световой пучок в пучок с радиальной или азимутальной поляризацией. В одном случае ЖК-слой выступает в качестве полуволновой пластинки с пространственно неоднородной ориентацией оси, в другом – используется твист эффект, формирующий закрученную ЖК-структуру. ЖК-элементы также позволяют преобразовывать бесселевы пучки в схеме их распространения в одноосном кристалле [5]. В слое ЖК толщиной 20 мкм реализовано спин-орбитальное взаимодействие, при котором имеет место одновременное изменение поляризации и топологического заряда.

Таким образом, приведенные методы демонстрируют разнообразные возможности управления фазовыми и поляризационными характеристиками гауссовых, сингулярных и бесселевых световых пучков при использовании схем поляризационной голографической записи, а также электрически управляемых ЖК-элементов.

Список литературы

1. Романов О.Г., Горбач Д.В., Толстик А.Л. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. С. 383-388.
2. Belyi V.N., Khilo N.A., Kazak N.S., Ryzhevich A.A., Forbes A. // Optical Engineering. 2011. V. 50. P. 059001.
3. Толстик А.Л. // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58 (10). С. 65-73.
4. Kazak A.A., Melnikova E.A., Romanov O.G., Tolstik A.L. // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2015. V. 18. P. 170-174.
5. Nazarov S.A., Gorbach D.V., Mel'nikova E.A., Kurilkina S.N., Tolstik A.L. // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. № 4. С. 189-192.

С.В. САЗОНОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

К ТЕОРИИ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ

Предложена процедура аналитического исследования динамики солитонов в градиентных волноводах, основанная на усредненном вариационном принципе. Показано, что в рамках этого подхода солитонные параметры подчиняются обобщенному уравнению Гросса-Питаевского для квантовой бозе-жидкости во внешнем поле.

S.V. SAZONOV

National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow

TO THE THEORY OF WAVEGUIDE PROPAGATION OF OPTICAL SOLITONS

A procedure for the analytical study of the dynamics of solitons in gradient waveguides, based on the averaged variational principle, is proposed. It is shown that within the framework of this approach, the soliton parameters obey the generalized Gross-Pitaevskii equation for a quantum Bose liquid in an external field.

Пространственно-временные солитоны (световые пули) представляют собой локализованные во всех направлениях и распространяющиеся с постоянной скоростью устойчивые сгустки световой энергии [1]. Для формирования световых пуль в объемной однородной среде необходима взаимная компенсация таких эффектов, как фокусирующая нелинейность, дисперсия и дифракция. При этом хорошо известно, что фокусирующая керровская (кубическая) нелинейность в купе с дифракцией и аномальной дисперсии групповой скорости (ДГС) неспособна в однородной объемной среде сформировать устойчивую световую пулю [1]. В некоторых случаях к устойчивому равновесию может привести линейная рефракция, создаваемая градиентным волноводом с неоднородным распределением в его поперечном сечении линейного показателя преломления. Возникает вопрос о том, как аналитически учесть влияние градиентного волновода. Световые пули могут использоваться в системах волоконно-оптической связи. Поэтому аналитические исследования распространения световых пуль в градиентных волноводах весьма желательны и актуальны.

Целью работы является теоретический анализ формирования и распространения световых пучков в градиентных волноводах на основе метода усредненного лагранжиана [2, 3]. В качестве основного примера рассматривается солитон нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) при учете координатной зависимости показателя преломления.

Предлагается вариационная процедура, восходящая к работам [2-4]. Основной смысл состоит в том, что параметры одномерного (временного) солитона считаются неизвестными функциями координат. В результате усреднения соответствующего НУШ лагранжиана по времени находятся уравнения для солитонных параметров. Полученная система совпадает с нелинейными уравнениями двумерного течения квантовой бозе-жидкости. Показатель преломления, зависящий от поперечных координат, играет роль плотности потенциальной энергии некоего внешнего поля, в которое помещена воображаемая жидкость. Данная квантовая гидродинамическая система с помощью преобразования Маделунга [5] сводится к обобщенному уравнению Гросса-Питаевского [4]. Качественный анализ, а также анализ приближенных аксиально-симметричных решений данной системы уравнений позволяет делать выводы об устойчивом или неустойчивом распространении солитонов. При этом в каждом конкретном случае могут быть получены условия на характер неоднородности показателя преломления в поперечном сечении волновода, а также на входные условия для солитона, при которых возможно его устойчивое распространение. В рассмотренном примере НУШ формирование пространственно-временных солитонов возможно в двух случаях: 1) при дефокусирующей керровской нелинейности и фокусирующем волноводе; 2) при фокусирующей керровской нелинейности и фокусирующем волноводе. Последний случай особенно важен, так как именно он чаще всего реализуется в приложениях. При этом мощность солитона должна быть меньше определенного критического значения, а характерный поперечный размер волновода не должен превышать длину самофокусировки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-11-01157).

Список литературы

1. Leblond H., Mihalache D. // *Physics Reports*. 2013. V. 523. P. 61.
2. Anderson D., Desaix M., Lisak M., Quiroga-Teixeiro M.L. // *JOSA B*. 1992. V. 9. P. 1358.
3. Жданов С.К., Трубников Б.А. // *ЖЭТФ*. 1987. Т. 92 (5). С. 612.
4. Сазонов С.В. // *ЖЭТФ*. 2006. Т. 130 (1). С. 145.
5. Rogers C., Malomed B. // *J. Math. Phys.* 2018. V. 59. P. 051506.

С.Н. КАРПОВ, И.М. ПОСТИ, А.В. ШЕСТЕРИКОВ, М.Ю. ГУБИН,
Н.М. ВОРОНОВА, А.Ю. ЛЕКСИН, А.В. ПРОХОРОВ

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

ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОННЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Разработаны математические модели в основу создания новой online САПР-платформы «DP Plasmonic», предназначенной для удаленного проектирования плазмонных схем обработки информации. Эта платформа может использоваться для автоматизированного проектирования параметров полупроводниковых квантовых точек (КТ) в качестве центров обработки информации. Также с ее помощью можно проводить моделирование распространения поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) в наноструктурированных волноводных схемах на основе графеноподобных материалов. Впервые предложена и с помощью «DP Plasmonic» спроектирована топология полностью-плазмонного транзистора на основе графенового нанорезонатора, нагруженного полупроводниковой квантовой точкой. Прогнозируемая тактовая частота устройства составляет 1ТГц при размере транзистора 20 нм.

S.N. KARPOV, I.M. POSTI, A.V. SHESTERIKOV, M.Yu. GUBIN,
N.M. VORONOVA, A.Yu. LEKSIN, A.V. PROKHOROV

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

DIGITAL DESIGN AND PARAMETERS OPTIMIZATION FOR PLASMONIC INFORMATION PROCESSING CIRCUITS

The mathematical models for the new online CAD-platform “DP Plasmonic” of plasmonic information circuits design have been developed. This platform provides the efficient framework for computer-aided design of semiconductor quantum dots as information processing centers and full-field simulation of surface plasmon-polariton propagation in plasmonic waveguides as an internal plasmonic processor bus. The topology of a graphene all-plasmonic transistor based on graphene nanoresonator loaded with quantum dots, partially designed in DP Plasmonic”, is proposed for the first time. The predicted clock frequency of the device is 1 THz and 20 nm transistor size.

Платформа «DP Plasmonic» представляет собой построенное по технологии клиент-сервер кроссплатформенное приложение, состоящее из двух модулей. Модуль «DP QD» хранит параметры полупроводниковых соединений АЗВ5 и А2В и позволяет сделать выбор

материала, на основе которого будут спроектированы квантовые точки (КТ) как центры обработки информации.

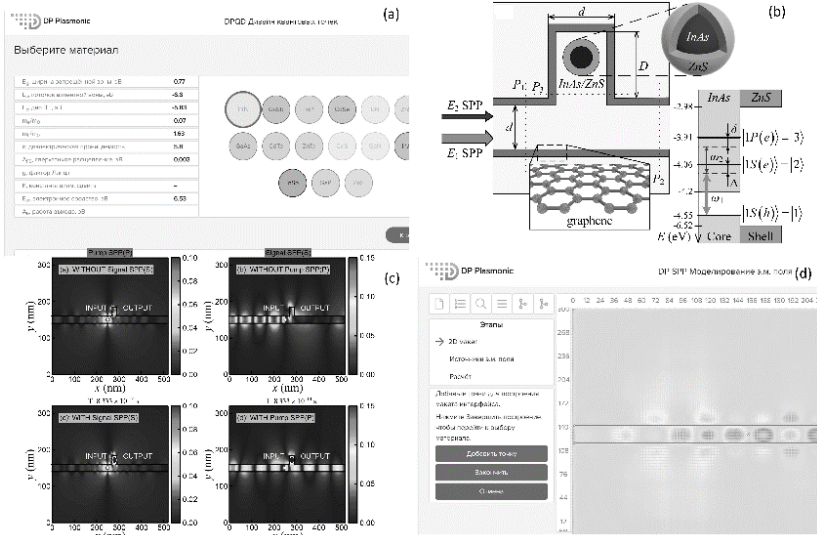


Рис. 1. Проектирование с использованием платформы «DP Plasmonic»

Модуль позволяет осуществить автоматизированный расчет зависимостей положения электронных и дырочных уровней, а также частот, дипольных моментов и скоростей релаксации для переходов между ними, – от размера КТ. Также платформа содержит модуль «DP SPP», который реализует метод конечных разностей во временной области (FDTD) для моделирования распространения ППП в плазмонных волноводах на основе перспективных графеноподобных материалов. Платформа позволяет спроектировать произвольный двумерный макет системы волноводов, разместить источники электромагнитного поля на сцене и выполнить полное полевое моделирование.

Разработанная платформа послужила средой проектирования плазмонного транзистора на основе графенового нанорезонатора, загруженного InN/GaN КТ. Переключение осуществляется за счет сильного нелинейного взаимодействия ППП мод в условиях лестничной схемы взаимодействия с КТ.

Работа поддержана Фондом содействия инновациям, договор № 2226 ГС1/37022.

Е.А. ПОНОМАРЕВА¹, С.Э. ПУТИЛИН¹, С.В. СМИРНОВ¹,
С.А. ШТУМПФ¹, М.В. МЕЛЬНИК¹, Е. ИВЭН², А.Н. ЦЫПКИН¹,
С.А. КОЗЛОВ¹, К.-Ч. ЖАНГ^{1,2,3}

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Рочестерский университет, США

³Столичный педагогический университет, Пекин, Китай

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ В ЖИДКОСТЯХ

Представлены экспериментальные и смоделированные зависимости генерации ТГц излучения при филаментации в различных жидкостях от энергии накачки, длительности импульса и толщины струи. Полученная эффективность преобразования оптического излучения в ТГц составляет более 0.2 %.

Е.А. PONOMAREVA¹, S.E. PUTILIN¹, S.V. SMIRNOV¹,
S.A. SHTUMPF¹, M.V. MELNIK¹, E YIWEN², A.N. TSYPKIN¹,
S.A. KOZLOV¹, X.-C. ZHANG^{1,2,3}

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²University of Rochester, USA

³Capital Normal University, Beijing, China

INVESTIGATION OF TERAHERTZ GENERATION BY FILAMENTATION IN LIQUIDS

We present experimental and simulated dependences of the THz generation during filamentation on the pump energy, pulse duration and thickness of the liquid jet. The resulting optical-to-THz conversion efficiency is more than 0.2 %.

Плазма, образованная лазерным филаментом, является эффективным источником ТГц излучения [1]. Вопрос о выборе оптимальной среды для генерации сводится к учету порога разрушения материала и максимально возможной эффективности преобразования. Из-за сильного поглощения в терагерцовом диапазоне, полярные жидкости долгое время не рассматривались в качестве ТГц источников. Тем не менее, в 2017 году была продемонстрирована возможность генерации как в водных пленках, так и в кюветах разными научными группами [2, 3].

Целью данной работы является определение оптимальных условий для генерации терагерцового излучения в струях воды и этанола. Экспериментальная установка использует фемтосекундный лазер с

параметрами $E_{\text{им}} = 450$ мкДж, 800 нм, 35-700 фс, 1 кГц. Лазерное излучение разделяется на две части, одна из которых функционирует в качестве зонда, другая фокусируется параболическим зеркалом ($f = 5$ см) на струю жидкости (100, 150 или 270 мкм). Для регистрации ТГц использована стандартная схема, основанная на электрооптическом эффекте.

Для численного моделирования используется уравнение нелинейной динамики субпикосекундного импульса с учетом плазменной нелинейности. [4]. На рис. 1 представлен результат численного моделирования зависимости, генерируемой ТГц энергии от различной длительности импульса накачки и различной толщины среды. Продемонстрировано экспериментально и с использованием численного моделирования наличие оптимальной длительности импульса накачки (рис. 2).

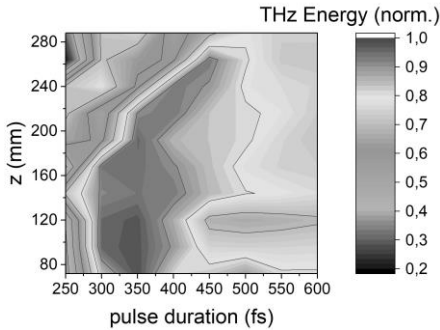


Рис. 1. Зависимость энергии ТГц излучения от различной длительности импульса при разной толщине среды

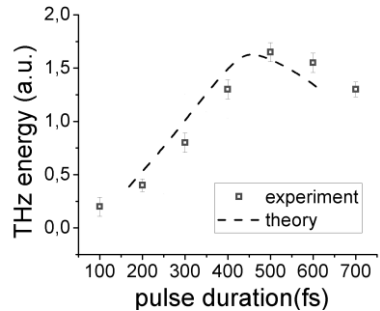


Рис. 2. Оптимальная длительность импульса при толщине среды 270 мкм

Список литературы

1. Hamster H., Sullivan A., Gordon S., Falcone R.W. // Phys. Rev. E. 1994. V. 49. P. 671.
2. Qi J., Yiwen E., Kaia W., et. al. // Applied Physics Letters. 2017. V. 111 (7). P. 071103.
3. Dey I., Jana K., Fedorov V.Yu., et. al. // Nat.Com. 2017. V. 8 (1), P. 1184.
4. Stumpf S.A., Korolev A.A., Kozlov S.A. // Proc. SPIE. 2006. V. 6614.

В.Б. НОВИКОВ, Б.И. МАНЦЫЗОВ, Т.В. МУРЗИНА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ
ПРИ ВРЕМЕННОМ ДИФРАКЦИОННОМ ДЕЛЕНИИ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ
КРИСТАЛЛАХ В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ**

Экспериментально и теоретически исследовано влияние эффекта дифракционного деления лазерных импульсов на синхронную генерацию второй оптической гармоники в одномерных фотонных кристаллах в условиях брэгговской дифракции излучения в геометрии Лауэ. Показано, что для некоторых условий фазового синхронизма эффект дифракционного деления лазерных импульсов определяет эффективность процесса удвоения частоты света. В этом случае максимальная мощность излучения второй гармоники может быть достигнута за счет выбора длительности фемтосекундных лазерных импульсов накачки.

V.B. NOVIKOV, B.I. MANTSYZOV, T.V. MURZINA
Lomonosov Moscow State University

**OPTICAL SECOND HARMONIC GENERATION
IN THE LAUE GEOMETRY IN 1D PHOTONIC CRYSTALS
UNDER DIFFRACTION-INDUCED LASER
PULSE-SPLITTING EFFECT**

The impact of the diffraction-induced laser pulse-splitting effect in the phase-matched optical second harmonic generation in one-dimensional photonic crystals under the Bragg diffraction of radiation in the Laue geometry was studied experimentally and theoretically. For some phase-matching conditions the diffraction-induced laser pulse-splitting effect is demonstrated to be essential in the frequency doubling efficiency. In this case the second harmonic power can be maximized by tuning of the duration of the femtosecond laser pump pulses.

Управление дисперсией света при помощи фотонных кристаллов (ФК) находит применение в нелинейной оптике для достижения выполнения условия фазового синхронизма, например, при генерации второй оптической гармоники (ГВГ) [1]. Для повышения мощности излучения второй гармоники (ВГ) в качестве накачки применяются высокоинтенсивные фемтосекундные лазерные импульсы. В этом случае

динамика сверхкоротких импульсов света внутри ФК имеет большое значение. Недавно было показано, что в одномерном (1D) ФК в условиях брэгговской дифракции в геометрии Лауэ возникает эффект дифракционно-индуцированного временного деления фемтосекундного лазерного импульса (ДДИ) падающего на ФК, заключающийся в формировании внутри структуры двух световых импульсов, расстояние между которыми увеличивается по мере распространения внутри ФК [2].

В работе исследуется синхронная ВГ при наличии эффекта дифракционного деления импульса накачки в 1D ФК при брэгговской дифракции в геометрии Лауэ. Исследования проводились на ФК из пористого кварца с внедренным внутрь пор сегнетоэлектриком нитритом натрия, служившим источником излучения ВГ. ФК длиной 250 мкм состоял из 335 пар слоев с показателями преломления $n_1 = 1.21$, $n_2 = 1.11$ и толщинами $d_1 = 339$ нм, $d_2 = 566$ нм. Параметры ФК были выбраны для выполнения фазового синхронизма, при котором импульс нелинейной поляризации индуцирован взаимодействием двух импульсов на основной частоте, возникших при эффекте ДДИ и движущихся с различными групповыми скоростями.

Экспериментально и теоретически с использованием метода медленно меняющихся амплитуд, а также нелинейного метода FDTD установлено, что эффект ДДИ приводит к немонотонной зависимости мощности ВГ от длительности лазерных импульсов τ (рис. 1), демонстрирующей максимум нелинейного сигнала при $\tau = 60-70$ фс. Положение максимума определяется конкуренцией двух факторов: пространственного перекрытия двух лазерных импульсов в ФК и уменьшением их амплитуды при увеличении длительности фемтосекундного импульса излучения накачки.

В работе показано, что путем выбора параметров ФК возможно выполнить условия фазового синхронизма, согласовать групповые скорости нелинейной поляризации и моды ВГ, максимизировать эффективность частотного преобразования, выбрав длительность лазерных импульсов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00710).

Список литературы

1. Centini M., et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. P. 4891-4898.
2. Svyakhovskiy S.E., et al. // JOSA B 2013. V. 30, P. 1261–1269.

А.И. МАЙМИСТОВ, Е.И. ЛЯШКО, С.О. ЕЛЮТИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА

Теоретически исследовано распространение поверхностной волны на границе раздела топологического изолятора и нелинейной подложки из обычного диэлектрика. Выведена система уравнений, описывающих малые возмущения однородной поверхностной волны, которая является суперпозицией поперечной электрической и поперечной магнитной волны. Определено условие, при котором однородная волна становится неустойчивой. Найдено выражение для стационарной уединенной поверхностной волны.

A.I. MAIMISTOV, E.I. LYASHKO, S.O. ELYUTIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODULATION INSTABILITY FOR THE NONLINEAR WAVES ON THE SURFACE OF TOPOLOGICAL INSULATOR

The propagation of a surface wave at the interface of a topological insulator and a nonlinear substrate from a conventional dielectric is investigated theoretically. System of the equations describing the small perturbations of the homogeneous surface wave, which is a superposition of the transverse electric and transverse magnetic waves, is derived. The condition under which a homogeneous wave becomes unstable is determined. An expression for the steady state solitary surface wave is found.

Известно, что вдоль границы раздела топологического изолятора [1, 2] и обычной среды возможно распространение электромагнитных волн, если диэлектрическая проницаемость среды отрицательная [3]. Помимо металла, отрицательная проницаемость может иметь место у гиперболических метаматериалов [4] и естественных сред, как-то оксид индия-олова (ИТО), который является прозрачным для видимого света полупроводником. Если диэлектрик обладает нелинейной восприимчивостью третьего порядка, то поверхностная волна может существовать для сред с положительной диэлектрической проницаемостью [5]. Как в линейном, так и в нелинейном случаях поверхностная волна на планарной границе раздела сред представляет собой суперпозицию поперечной электрической и поперечной магнитной

волн. Это является следствием магнито электрического эффекта, обусловленного природой топологического изолятора.

Для нелинейных волн с постоянной амплитудой часто имеет место неустойчивость относительно слабой модуляции. При этом, явление модуляционной неустойчивости имеет пороговый характер. Найденные в [4, 5] нелинейные поверхностные волны существуют, если мощность, переносимая волной, превышает определенное пороговое значение. Таким образом, становится необходимо исследовать возможность модуляционной неустойчивости такой волны, чтобы определить условия ее существования.

Здесь представлена система уравнений, описывающая распространение нестационарных поверхностных волн с учетом нелинейной восприимчивости третьего порядка. Для вывода этой системы уравнений использовалась многомасштабная теория возмущений. Если ограничиться первыми поправками по пространственным и временным производным от амплитуд поперечных компонент электрического поля волны, то стандартная процедура позволяет определить инкремент неустойчивости однородных поверхностных волн. Учет более высоких поправок (которые отражают эффекты дисперсии групповых скоростей второго порядка) приводит к системе уравнений для определения стационарных уединенных волн, или нелинейных периодических волн. Показано, что фазовая кросс-модуляция приводит к эволюции состояния поляризации волны, бегущей по поверхности топологического изолятора.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00921).

Список литературы

1. Hasan M.Z., Kane C.L. // Rev.Mod.Phys. 2010. V. 82. P. 3045.
2. Qi X.-L., Hughes T.L., Zhang S.-C. // Phys.Rev. B. 2008. V. 78. P. 195424.
3. Karch A. // Phys.Rev.Lett. 2009. V. 103. P. 171601.
4. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Оптика и спектроскопия 2016. Т. 121. С. 671.
5. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Известия РАН, сер. физ. 2018. Т. 82. С. 27.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАДИЕНТНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследованы эффекты деполяризации и вращения плоскости поляризации при распространении излучения в градиентном световоде. Показано, что степень поляризации как линейно, так и циркулярно поляризованного излучения уменьшается с расстоянием вследствие взаимодействия между поляризацией (спином) и траекторией пучка (орбитальным моментом).

N.I. PETROV

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

DEPOLARIZATION OF LIGHT IN GRADED-INDEX FIBER

The effects of depolarization and rotation of the polarization plane during the propagation of radiation in a graded-index fiber are studied. It is shown that the degree of polarization of both linearly and circularly polarized radiation decreases with distance due to the interaction between polarization (spin) and the beam trajectory (orbital momentum).

В однородной и изотропной среде без дисперсии поляризация излучения не изменяется в процессе распространения. При распространении же излучения в неоднородной среде происходят существенные изменения состояния и степени поляризации. Известно, что в неоднородной среде вектор поляризации поворачивается в процессе распространения луча света по траектории с кручением [1]. Такой поворот был обнаружен экспериментально в одномодовом волокне скрученном на цилиндр и интерпретирован в терминах геометрической фазы Берри. В [2] поворот плоскости поляризации был обнаружен также в прямолинейном многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. В волоконных световодах изменение входной поляризации как правило обуславливается двулучепреломлением среды. Однако деполяризация имеет место и в световодах без двулучепреломления [3, 4].

В настоящей работе исследуется эволюция поляризации в многомодовом изотропном градиентном волноводе. Показано, что деполяризация излучения в изотропной градиентной среде происходит вследствие спин-орбитального взаимодействия, причем этот механизм

проявляется для излучения как с линейной, так и с циркулярной поляризацией.

На рис. 1 представлены зависимости степени поляризации линейно поляризованного излучения от расстояния z для различных значений осевого смещения луча x_0 с учетом меридиональных лучей и сагиттальных лучей с сохраняющимся радиусом кручения ($p_{v0} = x_0\omega$). Видно, что степень поляризации излучения падает с расстоянием по квадратичному закону. С увеличением осевого смещения или угла наклона луча к оси волновода спад степени поляризации усиливается. Длина деполяризации меридиональных лучей больше по сравнению с длиной деполяризации сагиттальных лучей в 1.4 раза. На рис. 2 представлена зависимость угла поворота плоскости поляризации (фаза Берри) от угла наклона падающего пучка к оси световода. Из рис. 2 видно – теоретическая кривая достаточно хорошо описывает экспериментальные данные [2] несмотря на различие профилей показателя преломления рассматриваемых световодов. Отметим, что в случае сильно сфокусированных пучков излучения необходимо учитывать также продольную составляющую электрического поля [5, 6, 7].

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

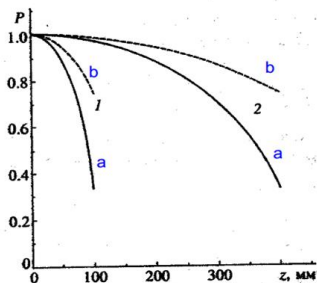


Рис. 1. Зависимость степени линейной поляризации от расстояния: кривые 1, $x_0 = 20$ мкм; кривые 2, $x_0 = 5$ мкм

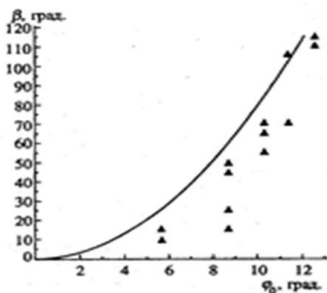


Рис. 2. Зависимость угла поворота плоскости поляризации от угла наклона (сплошная линия - теоретическая кривая, треугольные значки - экспериментальные значения [2])

Список литературы

1. Рытов С.М. // ДАН СССР. 1938. Т. 18. С. 2.
2. Зельдович Б.Я., Кундикова Н.Д. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. С. 184.
3. Petrov N.I. // J. Mod. Opt. 1996. V. 43. P. 2239.
4. Petrov N.I. // JETP. 1997. V. 112. P. 1985.
5. Petrov N.I. // Laser Physics. 2008. V. 18. P. 522.
6. Petrov N.I. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. P. 023815.
7. Petrov N.I. // JETP Letters. 2016. V. 103. P. 504.

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 ФОКУСИРОВКИ НА ГЕНЕРАЦИЮ СУПЕРКОНТИНУУМА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведено теоретическое исследование процесса генерации суперконтинуума при филаментации фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона в конденсированных средах. Определено влияние условий фокусировки на поведение спектра суперконтинуума при положительной и отрицательной дисперсии групповой скорости.

K.V. LVOV^{1,2}, S.Yu. STREMOUKHOV^{1,2}, F.V. POTEKIN¹

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow*

INFLUENCE OF FOCUSING CONDITIONS ON SUPERCONTINUUM GENERATION UNDER FILAMENTATION OF FEMTOSECOND LASER RADIATION

Were performed theoretical investigation of supercontinuum generation under filamentation of femtosecond near-IR radiation in condensed media. Were determined influence of focusing conditions on the supercontinuum spectrum under normal and anomalous group velocity dispersion.

Генерация суперконтинуума – уширение первоначального спектра импульса – возникает при филаментации мощного лазерного излучения. Генерируемый спектр покрывает диапазон от видимого до среднего ИК диапазона [1]. Его излучение широко применяется в качестве затравочного излучения для параметрических усилителей [2], в которых важно получить спектр как можно с более интенсивной красной областью. В работе численно исследуется влияние фокусировки на генерацию суперконтинуума в кристалле YAG как при положительной дисперсии групповой скорости ДГС (1240 нм), так и при отрицательной ДГС (1900 нм). Фокусное расстояние выбиралось в диапазоне 4-20 см, что соответствует значению числовой апертуры менее 0,02.

Как и в предыдущих работах [3, 4], в случае положительной ДГС при увеличении фокусного расстояния наблюдается большее уширение спектра в красную область и увеличение ее спектральной яркости (рис. 1). При отрицательной ДГС влияние фокусировки на спектр более сложное: его уширение в сторону больших длин волн уменьшается с ростом фокусного расстояния вплоть до 8 см, а затем снова увеличивается (рис. 2). Такое поведение объясняется большей плотностью генерируемой плазмы при меньшем фокусном расстоянии и, как следствие, большей дефокусировкой на ней. Это приводит к подавлению процессов генерации суперконтинуума [5, 6].

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 17-72-20130).

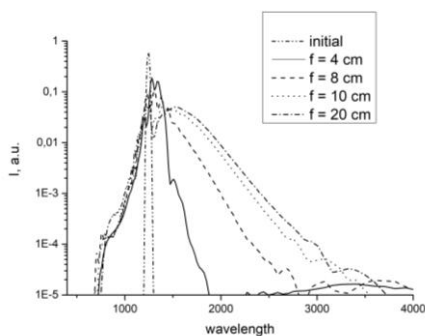


Рис. 1. Спектры суперконтинуума при различной фокусировке при положительной ДГС

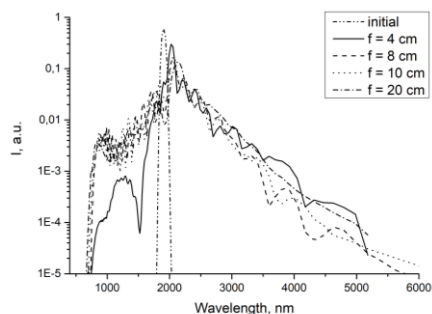


Рис. 2. Спектры суперконтинуума при различной фокусировке при отрицательной ДГС

Список литературы

1. Dubietis A., et al. // Lith. J. of Phys. 2017. V. 57 (3). P. 113-157.
2. Migal E.A., et al. // Opt. Lett. 2017. V. 42 (24). P. 5218-5221.
3. Jukna V., et al. // Appl. Phys. B. 2014. V. 116 (2). P. 477-483.
4. Bradler M., et al. // Appl. Phys. B. 2009. V. 97. P. 561-574.
5. Lvov K.V., et al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. P.085402.
6. Smetanina O.E., et al. // Laser Phys. Lett. 2013. V. 10. P. 105401.

Н.Г. ВЕСЕЛКОВА, Н.И. МАСАЛАЕВА, И.В. СОКОЛОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

**РАМАНОВСКАЯ КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ ДЛЯ СВЕТА
В РЕЗОНАТОРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВНЕ
ПРИБЛИЖЕНИЯ НИЗКОДОБРОТНОГО РЕЗОНАТОРА:
ЭФФЕКТ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ**

В работе произведен теоретический учет влияния эффекта четырехволнового смешения на квантовую память в резонаторной конфигурации для сигналов различной длительности. Было показано, как это приводит к дополнительному зашумлению квадратуры наблюдаемого сигнала на выходе из резонатора.

N.G. VESELKOVA, N.I. MASALAEVA, I.V. SOKOLOV
Saint-Petersburg State University

**CAVITY-ASSISTED ATOMIC RAMAN MEMORIES BEYOND
THE BAD CAVITY LIMIT: EFFECT OF FOUR-WAVE MIXING**

We present in our work a theoretical research of the four-wave mixing noise in the cavity-assisted atomic Raman memories, valid also for the signals whose duration is not much larger than the cavity field lifetime, that is, beyond the bad cavity limit. The finally estimated quantity is the noise variance of quadrature amplitudes of the output signal. We present the noise contributions, associated with the four-wave mixing and with the different from unity quantum efficiency, for a wide range of the signal duration.

Эффективно работающая квантовая память [1] является существенной частью многих квантовых информационных протоколов таких как: квантовые сети, квантовые повторители, схемы квантовых вычислений и т.д. Существует множество эффектов, которые в реальных схемах снижают качество квантовой памяти за счет вносимых шумов. Одним из таких эффектов является четырехволновое смешение, которое возникает, когда помимо канала памяти во взаимодействие включается параллельный канал. Для подавления нежелательных последствий от этого эффекта было предложено помещать квантовую память в резонатор (рис. 1), поддерживающий канал памяти, но подавляющий параллельный канал - канал люминесценции. В статье [2] рассматривалось приближение низкодобротного резонатора (bad cavity limit), что накладывало существенные ограничения на длительность падающих полей.

В нашей работе мы исследовали влияние эффекта четырехволнового смещения на резонаторную квантовую память для полей, чья длительность может быть немного больше времени жизни поля в резонаторе, то есть, выходя за рамки низкодобротного резонатора. В конечном итоге, нам удалось показать, какой добавочный шум в наблюдаемые вносит канал люминесценции. В качестве наблюдаемой выступала квадратура детектируемого поля, полученного в результате гомодинного детектирования излучения, выходящего из резонатора в процессе считывания из квантовой памяти.

На рис. 2 представлена зависимость флуктуации квадратуры детектируемого поля от длительности считываемых импульсов (3). Данная флуктуация определяется двумя вкладками: неэффективностью считывания из квантовой памяти (2) и шумами, вносимыми эффектом четырехволнового смещения (1). Дополнительный шум, вносимый каналом люминесценции, для коротких импульсов несущественно отличается от шума для более продолжительных импульсов. Однако для коротких импульсов эффективность считывания оказывается значительно более низкой.

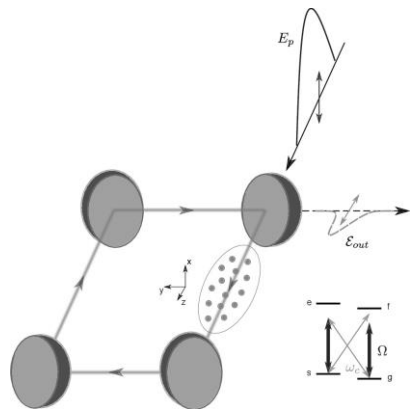


Рис. 1. Схема резонаторной квантовой памяти

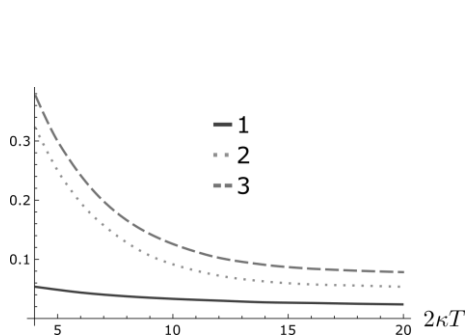


Рис. 2. Зависимость флуктуаций наблюдаемой квадратуры поля (3) от длительности считываемых импульсов

Список литературы

1. Hammerer K., Sørensen A.S., Polzik E.S. // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. P. 1041.
2. Nunn J., Munns J., et al. // Phys. Rev. A. 2017. V. 96. P. 012338.

Д.М. ЦВЕТКОВ, В.А. БУШУЕВ, Б.И. МАНЦЫЗОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В КВАЗИ-PT-СИММЕТРИЧНЫХ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

Рассмотрена динамика распространения коротких лазерных импульсов с конечным спектром в квази-PT-симметричных средах с учетом материальной дисперсии. Показано, что неоднородное уширение спектральной линии резонансных атомов может обеспечить широкополосную PT-симметрию в конечном диапазоне частот, формально запрещенную принципом причинности. На примере динамической брэгговской дифракции в геометрии Лауэ показаны такие эффекты как асимметрия распространения, деление и усиление коротких лазерных импульсов в квази-PT-симметричных фотонных кристаллах (ФК).

D.M. TSVETKOV, V.A. BUSHUEV, B.I. MANTSYZOV
Lomonosov Moscow State University

OPTICAL PULSE DYNAMICS UNDER QUASI-PT SYMMETRY IN PHOTONIC CRYSTALS

Dynamics of short laser pulses with a finite spectrum in quasi-PT-symmetric dispersive media has been considered. It is shown that inhomogeneous broadening of the spectral line of resonant atoms may sustain PT-symmetry in a finite frequency range, what is formally prohibited by the causality principle. In addition, such effects as propagation asymmetry, division and amplification of short laser pulses in quasi-PT-symmetric photonic crystals is illustrated on example of Bragg diffraction in Laue geometry.

В последнее десятилетие активное развитие оптики PT-симметричных сред позволило наблюдать множество новых оптических явлений в случае параксиального приближения для монохроматических пучков и квазимонохроматических импульсов [1, 2]. Однако динамика распространения коротких импульсов в PT-симметричных средах остается мало изученной, так как вследствие принципа причинности, выраженного в оптике в соотношении Крамерса-Кронига, PT-симметрия в среде может быть реализована лишь для одной частоты света [3].

Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия коротких оптических импульсов с PT-симметричной средой, обладающей материальной дисперсией. Большое неоднородное уширение

спектральной линии резонансных атомов может обеспечить широкополосную квази-РТ-симметрию, т.е. восстановление РТ-симметричных свойств среды в непрерывной области частот [4]. Так, на рис. 1 показана возможность восстановления эффекта однонаправленного брэгговского отражения для короткого импульса в квази-РТ-симметричной среде на примере дифракции в геометрии Лауэ. Рис. 1*a,b* – отсутствие асимметрии брэгговского отражения при изменении знака угла падения импульсов на ФК в случае малого неоднородного уширения по сравнению с однородным; рис. 1*c,d* – восстановление асимметричной динамики при квази-РТ-симметрии. На рис. 2 представлен эффект деления импульса в случае широкополосной квази-РТ-симметрии. При положительном угле падения импульса на ФК, (*a*), импульс распространяется почти без изменений как в однородной прозрачной среде, а при отрицательном, (*b*), – претерпевает деление на два импульса, причем бормановский импульс состоит лишь из дифрагированной волны, что кардинально отличает его от случая консервативного ФК.

Восстановление квази-РТ-симметрии позволяет наблюдать множество новых оптических явлений, важных для управления динамикой лазерных импульсов за счет малых изменений параметров ФК.

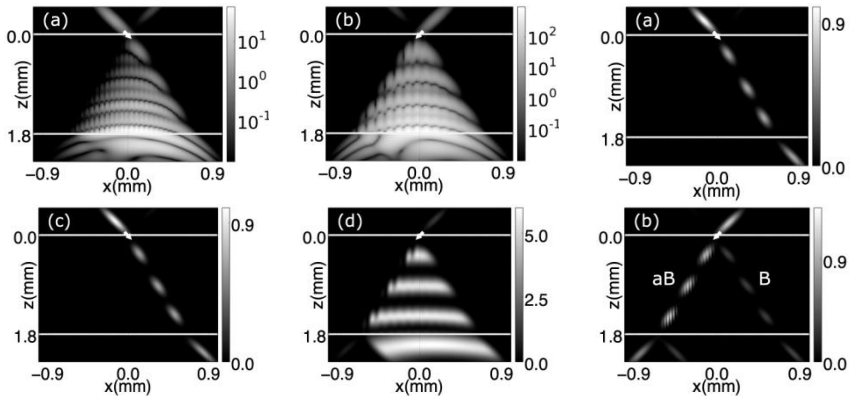


Рис. 1. Восстановление РТ-симметрии на примере асимметрии брэгговского отражения

Рис. 2. Деление импульса в РТ-симметричном ФК

Список литературы

1. Konotop V.V., Yang J., Zezyulin D.A. // Rev. Mod. Phys. 2016. V. 88. P. 035002.
2. Bushuev V.A., Dergacheva L.V., Mantsyzov B.I. // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. P. 33843.
3. Zyablovsky A.A., Vinogradov F.P., et al. // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 33808.
4. Tsvetkov D.M., Bushuev V.A., Konotop V.V., et al. // Phys.Rev.A. 2019 (accepted).

М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ, К.А. МАКАРОВА
*Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
Архангельск*

**РАССЕЯНИЕ АТТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
С ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ, СОВЕРШАЮЩЕЙ
РЕЗОНАНСНУЮ ПЕРЕЗАРЯДКУ ПРОТОНА
НА АТОМЕ ВОДОРОДА**

В работе получено выражение для расчётов спектров рассеяния аттосекундного импульса с учётом его магнитной составляющей, на динамической системе, совершающей резонансную перезарядку протона на атоме водорода. Было показано, что при использовании аттосекундного импульса электромагнитного поля гауссовой формы, возможна генерация гармоник при взаимодействии такого импульса с рассматриваемой системой. Также установлено, что спектры рассеяния существенно зависят от стадий образования квазимолекулы при резонансной перезарядке протона и могут быть использованы для описания динамики данной реакции.

М.К. ESEEV, D.N. MAKAROV, K.A. MAKAROVA
Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Archangelsk

**SCATTERING ATTOSECOND PULSE
OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD WHEN INTERACTING
WITH A DYNAMIC SYSTEM THAT PERFORMS RESONANT
OVERCHARGE OF A PROTON ON A HYDROGEN ATOM**

In the article expression for calculating the scattering spectra of an attosecond pulse, taking into account its magnetic component, on a dynamic system that performs resonant overcharge of a proton on a hydrogen atom is obtained. It was shown that when an attosecond pulse of an electromagnetic field of a Gaussian form is used, the generation of harmonics is possible when such a pulse interacts with the system under consideration. It was also established that the scattering spectra substantially depend on the stages of the formation of a quasi-molecule during resonant charge exchange of the proton and can be used to describe the dynamics of a given reaction.

Недавно был запущен рентгеновский лазер на свободных электронах (XFEL), который позволяет получать мощные ультракороткие импульсы электромагнитного поля с длительностью порядка нескольких

фемтосекунд [1]. Ведется работа по сокращению длительности таким импульсов до нескольких аттосекунд [2]. Такие импульсы можно использовать для исследования динамики сверхбыстрых процессов, например при катализе химических реакций.

В работе [3] была найдена волновая функция связанного электрона в поле аттосекундного импульса, с учётом его магнитной составляющей. Решение было найдено при использовании приближения внезапных возмущений в аналитическом виде, что позволяет его применять для любых систем, в том числе и динамических. Например, в работе [4] было показано, что учёт магнитной составляющей аттосекундного импульса может повлиять на вероятности неупругих процессов и на процессы рассеяния аттосекундного импульса. В работе [5] было показано по спектрам рассеяния аттосекундного импульса без учета магнитной составляющей поля можно судить об образовании квазимолекулы при резонансной перезарядке протона на атоме водорода. Такая система является динамической, т.е. состояние системы меняется во времени. Однако полное описание рассеяния мощного аттосекундного импульса на такой квазимолекуле возможно только с учётом его магнитной составляющей. В итоге нами было получены выражения для расчётов спектров рассеяния аттосекундного импульса с учётом его магнитной составляющей, на динамической системе, совершающей резонансную перезарядку протона на атоме водорода. Было показано, что при использовании аттосекундного импульса электромагнитного поля гауссовой формы, возможна генерация гармоник при взаимодействии такого импульса с рассматриваемой системой. Также установлено, что спектры рассеяния существенно зависят от стадий образования квазимолекулы при резонансной перезарядке протона на атоме водорода и могут быть использованы для описания динамики данной реакции.

Список литературы

1. Helml W., et. al. // Appl. Sci. 2017. V. 7 (9). P. 915.
2. Kida Y., Kinjo R., et. al. // Phys. Let. A. 2016. V. 109. P. 151107.
3. Макаров Д.Н., Матвеев В.И. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103(6). С. 464-468.
4. Макаров Д.Н., Матвеев В.И. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103(12). С. 851-856.
5. Матвеев В.И., Макаров Д.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99(5). С. 299-306.

Е.В. КАЗАНЦЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПОЛЯРИЗАЦИИ
ТОНКОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЁНКИ
И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ
В ПАРАЭЛЕКТРИКЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
УЛЬТРАКОРОТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИМПУЛЬСА**

В работе приводятся результаты исследований динамического отклика поляризации, возникающей в сегнетоэлектрической плёнке под действием электрического поля светового импульса. Теоретически определены время релаксации и период колебаний поляризации. Проведено численное моделирование устойчивости уединённой волны в сегнетоэлектрике.

E. V. KAZANTSEVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**POLARIZATION DYNAMICS OF THIN FERROELECTRIC
FILM, AND FERROELECTRIC LAYER IN PARAELECTRIC
SUBJECTED TO THE ELECTRIC FIELD
OF THE ULTRASHORT ELECTROMAGNETIC PULSE**

In this work is investigated the polarization dynamics of ferroelectric film under the influence of electric field of light pulse. Theoretically are obtained the relaxation time and oscillation period of polarization. The numerical simulation of solitary wave stability in ferroelectric is performed.

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов началось с обнаружения спонтанной поляризации в кристаллах сегнетовой соли [1-4]. Одним из наиболее широко изученных сегнетоэлектриков является титанат бария [5-8]. Значительный интерес вызывают тонкие сегнетоэлектрические плёнки на основе бария стронция титаната (БСТ). При разных соотношениях между значениями x и $1-x$, концентрациями бария и стронция, можно получить плёнки с различными температурами фазового перехода. Спектры фононных мод БСТ в зависимости от компонентного состава приведены в [9, 10]. Теоретически и численно

исследовано переключение поляризации в тонкой сегнетоэлектрической плёнке при прохождении через неё электромагнитного импульса [11].

В [12, 13] проведено сравнение эксперимента, состоявшего в определении высокочастотного поляризационного отклика тонкой плёнки сегнетоэлектрика при воздействии импульса наносекундной длительности, с моделью, основанной на феноменологическом уравнении теории Гинзбурга-Ландау-Девоншира для сегнетоэлектрика и уравнения Максвелла для электрической компоненты импульса. Численное исследование устойчивости уединённых волн в ферроэлектрике в приближении однонаправленного распространения волны выполнено в [14]. Аналитические решения в форме солитонов на пьедестале, кинков и доменных стенок найдены в [15].

В данной работе для тонкой плёнки БСТ с концентрацией бария $x = 0,7$ определены параметры теоретической модели, при которых достигается наибольшее соответствие экспериментальным графикам временной зависимости появляющейся при прохождении импульса неравновесной поляризации. Приведены результаты численного исследования устойчивости связанной уединённой волны поляризации среды и электрического поля импульса, попадающей из параэлектрика, в котором она распространяется без изменения скорости и формы, в слой вещества, обладающего двумя устойчивыми состояниями поляризации среды и неустойчивым состоянием с нулевой поляризацией.

Список литературы

1. Valasek J. // Phys. Rev. 1919. V. 17. № 4. P. 475-481.
2. Mueller H. // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 565-573.
3. Jaffe H. // Phys. Rev. 1937. V. 51. P. 43-47.
4. Sawyer C.B., Tower C.H. // Phys. Rev. 1930. V. 35. P. 269-273.
5. Merz W.J. // Phys. Rev. 1949. V. 76. № 8. P. 1221-1225.
6. Ржанов А. В. // УФН. 1949. Т. 38. Вып. 8. С. 461-489.
7. Вул Б.М. // УФН. 1967. Т. 93. Вып. 11. С. 541-552.
8. von Hippel A. // Rev. Mod. Phys. 1950. V. 22. № 3. P. 221-237.
9. Леманов В. В. // Физика твёрдого тела. 1997. Т. 39. № 2. С. 365-369.
10. Tenne D. A., Soukiasian A., Xi X.X., Choosuwan H., Guo R., Bhalla A.S. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 174302.
11. Caputo J.G., Kazantseva E.V., Maimistov A.I. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 014113.
12. Caputo J.G., Maimistov A.I., Mishina E.D., Kazantseva E.V., Mukhortov V.M. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 094113.
13. Kazantseva E.V., Mishina E.D., Mukhortov V.M., Sigov A.S. // Ferroelectrics. 2010. V. 400. P. 269-275.
14. Казанцева Е.В., Маймистов А.И. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99. № 1. С. 98-104.
15. Маймистов А.И., Казанцева Е. В. // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 8. С. 1105-1107.

Р.Ф. МАЛИКОВ, И.В. РЫЖОВ¹, А.В. МАЛЫШЕВ^{2,3},
В.А. МАЛЫШЕВ⁴

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа

¹*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург*

²*Мадридский университет Комплутенсе, Испания*

³*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

⁴*Университет Гронингена, Нидерланды*

НЕЛИНЕЙНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК МОНОСЛОЯ Λ-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ: МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ И АВТОКОЛЕБАНИЯ

Теоретически исследован нелинейный оптический отклик монослоя Λ -излучателей. Показано, что данная система может оперировать как бистабильное зеркало, а также обнаруживает автоколебательный режим. Эти свойства делают подобные системы перспективными для нанофотоники.

R.F. MALIKOV, I.V. RYZHOV¹, A.V. MALYSHEV^{2,3},
V.A. MALYSHEV⁴

Akmullah State Pedagogical University of Bashkortostan, Ufa

¹*Hertsen State Pedagogical University, Saint-Petersburg*

²*Complutense University of Madrid, Spain*

³*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

⁴*University of Groningen, The Netherlands*

NONLINEAR OPTICAL RESPONSE OF A MONOLAYER OF Λ -EMITTERS: MULTISTABILITY AND SELF-OSCILLATIONS

We study theoretically the optical response of a monolayer comprising Λ -emitters. It is shown that the system may operate as a tunable bistable mirror as well as exhibit self-oscillations. All this makes such systems important for nanophotonic applications.

После открытия графена [1] были синтезированы другие кристаллические двумерные материалы с необычными оптическими и транспортными свойствами, такие как дихалькогениды переходных металлов [2], а также двумерные суперкристаллы полупроводниковых квантовых точек [3, 4] и органических полимеров [5].

В настоящем сообщении рассматривается теоретически нелинейный оптический отклик монослоя трехуровневых квантовых излучателей с дублетом в основном состоянии (Λ -схема). Предполагается, что оптические переходы разрешены только между верхним состоянием $|3\rangle$ и состояниями дублета $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Учитывается релаксация в подсистеме дублетных состояний $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Для описания динамики единичного излучателя используется формализм матрицы плотности, в котором поле, действующее на выделенный излучатель, представляет собой сумму внешнего поля и поля всех остальных излучателей. Последнее является причиной положительной обратной связи в системе излучателей, которая вместе с их нелинейностью приводит к мультстабильности и неустойчивости оптического отклика монослоя.

Развит метод аналитического решения управляющих уравнений в стационарном режиме. На его основе найдено, что стационарный отклик монослоя может быть многозначным (до кратности пять) в зависимости от расщепления дублета и скорости релаксации. Метод показателей Ляпунова использован для анализа стабильности различных ветвей мультстабильного оптического отклика.

Расчеты временной динамики отклика показали, что основной тип нестабильности системы представляет собой автоколебания, частота которых зависит от амплитуды внешнего поля и дублетного расщепления, то есть может быть перестраиваемой.

Другой важной особенностью оптического отклика монослоя является его практически стопроцентная отражательная способность в определенной полосе частот, то есть в данной полосе монослой является идеальным зеркалом. Сверх того, его отражательная способность может быть переключена незначительным изменением амплитуды внешнего поля (бистабильность).

В заключение, монослой Λ -излучателей является перспективным объектом для применений в нанофотонике. Двумерные ароматические кристаллы с вибронной структурой основного состояния могут рассматриваться в качестве кандидатов на реализацию такой системы.

Список литературы

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., et. al. // Science. 2004. V. 306. P. 666.
2. Чернозатонский Л.А., Артюх А.А. // УФН. 2018. Т. 188. С. 3.
3. Evers W.H., Goris B., Bals S., et. al. // Nano Lett. 2013. V. 13. P. 2317.
4. Malikov R.F., Ryzhov I.V., Malyshev V.A. // EPJ Web of Conf. 2017. V. 161. P. 02014.
5. Zapatero P.Á., Malikov R.F., Ryzhov I.V., et. al. // Preprint ArXiv:1806.00387v1.
6. Liu W., Luo X., Bao Y., et. al. // Nat. Chem. 2017. V. 9. P. 563.

А.А. ГОШЕВ, М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ, В.М. ЮЛКОВА
*Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
Архангельск*

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АТТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ АНИОНАМИ

Получены выражения для расчётов спектров рассеяния аттосекундного импульса, на атомарных и молекулярных анионах, с учётом магнитной составляющей электромагнитного поля. Показано, что при использовании аттосекундного импульса электромагнитного поля гауссовой формы, возможна генерация второй гармоники при взаимодействии такого импульса с рассматриваемой системой. Также установлено, что спектры рассеяния зависят от ориентации молекулярного аниона в пространстве, что даёт возможность определять его ориентацию и анализировать структуру содержащих анионы комплексов.

A.A. GOSHEV, M.K. ESEEV, D.N. MAKAROV, V.M. YULKOVA
Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Archangelsk

ORIENTATION EFFECTS IN THE INTERACTION OF THE ATTOSECOND PULSE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD WITH MOLECULAR ANIONS

Expressions are obtained for calculating the scattering spectra of an attosecond pulse on atomic and molecular anions, taking into account the magnetic component of the electromagnetic field. It is shown that with the use of an attosecond pulse of the Gaussian form electromagnetic field, the second harmonic can be generated when such a pulse interacts with the system under consideration. It was also found that the scattering spectra depend on the molecular anion orientation in space. This makes it possible to determine its orientation based and structure of anion-containing complexes on a known pattern of the scattering spectrum.

В настоящее время развиваются возможности генерации и использования ультракоротких лазерных импульсов в различных исследованиях. Достаточно отметить, что Нобелевская премия 2018 года была присуждена за метод генерации высокоинтенсивных ультракоротких оптических импульсов. Недавно стали доступны аттосекундные длительности лазерных импульсов порядка 43 аттосекунд [1]. Процессы с

использованием таких импульсов перспективны для структурного анализа различных молекул с высоким пространственным разрешением.

По причине большой интенсивности импульса, важным является учет всех силовых характеристик поля, вызывающих неупругие процессы в объектах воздействия. В работе [2] была найдена, в аналитическом виде, волновая функция связанного электрона (например, электрон в атоме или в молекуле и др.) в поле аттосекундного импульса с учётом его магнитной составляющей. Решение было найдено в приближении внезапных возмущений в общем виде, что позволяет его применять для любых рассматриваемых систем. Например, в работе [3] было показано, что учёт магнитной составляющей аттосекундного импульса может влиять на вероятности неупругих процессов и на процессы рассеяния аттосекундного импульса. В работах [4], [5] было показано, что по спектрам рассеяния и ионизационным спектрам аттосекундного импульса можно судить об ориентационных эффектах на анионах с учетом только электрической составляющей падающего ультракороткого импульса. Однако более полное описание рассеяния аттосекундного импульса на атомарных и молекулярных анионах возможно только с учётом его магнитной составляющей, что, конечно, приводит к новым результатам для спектров рассеяния и ионизации. Таким образом, нами было получены выражения для расчётов спектров рассеяния аттосекундного импульса, на атомарных и молекулярных анионах, с учётом магнитной составляющей электромагнитного поля. Было показано, что при использовании аттосекундного импульса электромагнитного поля гауссовой формы, возможна генерация второй гармоники при взаимодействии такого импульса с рассматриваемой системой. Также установлено, что спектры рассеяния зависят от ориентации молекулярного аниона в пространстве, что даёт возможность определять его ориентацию и структуру содержащих анионы комплексов. Полученные выражения имеют аналитический вид, что даёт возможность провести наиболее полный анализ рассматриваемой системы.

Список литературы

1. Gaumnitz Th., et. al. // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 27506-27518.
2. Макаров Д.Н., Матвеев В.И. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103(6). С. 464-468.
3. Макаров Д.Н., Матвеев В.И. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103(12). С. 851-856.
4. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. // Опт. и спектр. 2011. Т. 111(3). С. 360-363.
5. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40 (2). С. 16-22.

С.Б. КОРОЛЕВ, Т.Ю. ГОЛУБЕВА, Ю.М. ГОЛУБЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ МИНИМАЛЬНОГО СЖАТИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КВАНТОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ

В данной работе мы оценили возможности генерации кластерных состояний различной топологии, обладая ограниченным ресурсом сжатия исходных осцилляторов, на основе которых строится кластер. Мы получили условие минимального сжатия для построения кластера заданной топологии.

S.B. KOROLEV, T.Yu. GOLUBEVA, Yu.M. GOLUBEV
Saint-Petersburg State University

CRITERIA OF MINIMUM SQUEEZING FOR QUANTUM CLUSTER STATE GENERATION

In our work, we assess the possibilities of generating cluster states with different topologies possessed by the finite squeezing resource of the initial oscillators used to generate the cluster state. We obtained the condition on minimum squeezing required for generating a cluster with a given topology.

Однонаправленные квантовые вычисления являются одним из возможных путей к созданию универсального квантового компьютера [1]. Их реализация предполагает использование своего рода "ресурса", – физической системы, находящейся в квантовом кластерном состоянии [1]. Каждый отдельный элемент такой системы связан с одним или несколькими другими элементами системы посредством квантовой перепутанности, так что все вместе они образуют сложную физическую структуру. Математическое описание этой структуры может быть приведено с помощью ненаправленного графа, узлами которого являются сами элементы физической системы, а в качестве ребер выступает квантовая перепутанность между ними. От конфигурации (или топологии) графа зависит тип логических операций (вентилей), осуществляемых путем последовательных локальных измерений над отдельными узлами. В работе [2] было показано, что такой подход к реализации универсального квантового компьютера является эффективным и ни в чем не уступает "стандартным" квантовым вычислениям на обратимых квантовых логических вентилях.

Основным препятствием для реализации эффективных информационных приложений, основанных на однонаправленных квантовых вычислениях, является низкая степень масштабируемости данных вычислений. На физическом уровне проблема масштабируемости связана с ограничениями на размерность и топологию кластерных состояний, что в свою очередь приводит к ограничениям на количество логических операций и объем обрабатываемой информации. Значительную роль при этом играет тип переменных, с помощью которых описывается физическая система, так как именно он определяет характер этих ограничений.

В своей работе мы рассматриваем кластерные состояния, описываемые непрерывными переменными. Для генерации таких состояний используются квантовые осцилляторы в гауссовском квадратурно-сжатом состоянии. В большинстве первых работ по кластерным состояниям на непрерывных переменных, целью которых было показать принципиальную возможность реализации на них однонаправленных квантовых вычислений, степень сжатия отдельных осцилляторов оценивалась ее предельным значением – бесконечностью. Однако в реальных условиях осцилляторы имеют конечное сжатие, что приводит к ограничениям на топологии кластерных состояний.

В настоящей работе, мы получим критерий, определяющий минимальную степень квадратурного сжатия необходимую для формирования кластерного состояния с заданной топологией. С помощью этого критерия мы нашли, какие из узлов кластерного состояния требуют для своего формирования наибольшего сжатия. Также мы можем оценить максимальное количество соседних узлов для осциллятора с фиксированным сжатием. Все это позволяет нам оценивать различные топологии квантовых кластерных состояний количественно, и на основе этих оценок сформулировать оптимальные стратегии по их генерации.

Список литературы

1. Raussendorf R., Briegel H. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 5188.
2. Raussendorf R., et. al. // Ann. Rev. of Cond. Matt. Phys. 2012. V. 86. P. 239-261.

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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПО ПОЛЫМ РЕВОЛЬВЕРНЫМ СВЕТОВОДАМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Впервые наблюдалось распространение оптического разряда в полом световоде револьверного типа. В световод с диаметром полой сердцевины 20 мкм вводилось излучение импульсного неодимового лазера. После инициирования наблюдалось движение волны разрушения навстречу лазерному излучению со средней скоростью ~ 1 м/с при средней мощности излучения около 2 Вт.

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

LASER INDUCED FIBER FUSE EFFECT IN REVOLVER HOLLOW-CORE FIBERS

The propagation of an optical discharge in a revolver hollow-core fiber was observed for the first time. The radiation of a pulsed Nd:YAG-laser was launched into the fiber with 20 μm core diameter. After initiation a destruction wave moved to the laser with an average velocity of ~ 1 m/s at average radiation power of ~ 2 W.

Впервые распространение оптического разряда в световодах из кварцевого стекла наблюдалось в 1987 году (см. обзор [1]). В дальнейшем данный эффект также наблюдался в различных световодах со стеклянной сердцевиной [1]. Световоды с полой сердцевиной активно исследуются уже больше 10 лет, однако данный эффект в них до сих пор не был исследован.

В настоящей работе исследован процесс разрушения полых револьверных световодов из кварцевого стекла под действием лазерного излучения. Вид поперечного сечения такого световода представлен на рис. 1 (b2).

Излучение лазера вводилось в полую сердцевину световода. Лазер работал одновременно в режиме модуляции добротности и синхронизации мод. Излучение лазера представляло собой последовательность 130 нс пакетов 100 пс импульсов с частотой следования 76 МГц. Пакеты же следовали с частотой 1200 Гц. Процесс разрушения инициировался с помощью металлического лезвия, которое подносилось вплотную к

выходному торцу световода. Перед инициированием оптического разряда на выходе световода средняя мощность составляла 2 Вт, что соответствует пиковой мощности 1 МВт.

Полый световод без полимерного покрытия после прохождения по нему оптического разряда представлен на рис. 1. На рис. 1 (a1, b1) приведены фотографии, сделанные сбоку световода, стрелками указаны места, где световод был сколот для получения фотографий a2 и b2, соответственно.

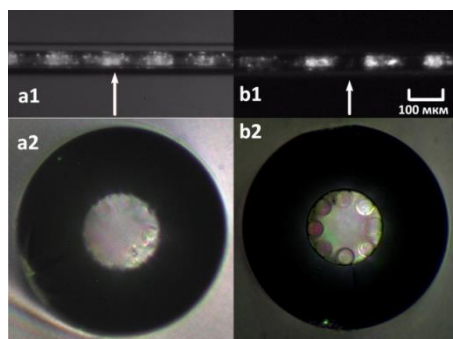


Рис. 1. Световод после прохождения по нему оптического разряда: вид сбоку (a1, b1), стрелками указаны места скола;– фотографии поперечного сечения световода, соответствующие местам, указанным на a1, b1 (a2, b2), на a2 и b2 внешний диаметр световода - 100 мкм

Из рис. 1 видно, что светлые области на рис. a1 и b1 представляют из себя зоны с разрушенными капиллярами (см. рис. a2), а в областях между ними капилляры остаются неповрежденными (см. рис. b2). Фотография световода во время прохождения по нему оптического разряда показала свечение плазмы по всей длине световода (и в светлых и в темных областях рис. a1 и b1). Поэтому можно сделать вывод, что плазма оптического разряда распространяется по полой сердцевине световода, и лишь в некоторых областях повышенные температура и давление плазмы разряда приводят к разрушению капилляров.

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

Список литературы

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

В.А. АНАНЬЕВ^{1,2}, В.В. ДЕМИДОВ¹, С.О. ЛЕОНОВ³,
Г.К. АЛАГАШЕВ⁴, Е.А. ЕЛИСТРАТОВА³,
А.С. МАТРОСОВА^{1,2}, Н.В. НИКОНОРОВ²

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

⁴Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

ОДНОМОДОВЫЕ ПОЛЫЕ АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ ВОЛОКНА С СЕРДЦЕВИНОЙ ДИАМЕТРОМ 50 мкм И ОБОЛОЧКОЙ НА ОСНОВЕ ВОСЬМИ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ КАПИЛЛЯРОВ

Обсуждаются результаты численных и экспериментальных исследований спектральных характеристик оптических потерь и модового состава излучения в полых антирезонансных световодах с сердцевинной диаметром 50 мкм и оболочкой на основе восьми соприкасающихся капилляров трапециевидной формы.

V.A. ANANYEV^{1,2}, V.V. DEMIDOV¹, S.O. LEONOV³,
G.K. ALAGASHEV⁴, E.A. YELISTRATOVA³,
A.S. MATROSOVA^{1,2}, N.V. NIKONOROV²

¹Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

²ITMO University, Saint-Petersburg

³Bauman Moscow State Technical University

⁴Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow

SINGLE-MODE HOLLOW-CORE ANTIRESONANT FIBERS WITH A 50 MICRON CORE AND A CLADDING FORMED BY EIGHT CONTIGUOUS CAPILLARIES

Discusses the results of numerical and experimental studies of the spectral characteristics of optical losses and modal content in hollow-core antiresonant fibers with a core of 50 μm in diameter and a cladding formed by eight contiguous capillaries having a trapezoidal shape.

Разработка кварцевых световодов с полый сердцевинной, основанных на антирезонансном отражении света, продолжает оставаться актуальным направлением волоконной оптики. Такие световоды перспективны для осуществления высокоэффективного взаимодействия лазерного излучения с веществом [1], транспорта ультракоротких лазерных импульсов [2],

передачи оптических сигналов с минимальными потерями мощности в среднем ИК-диапазоне [3].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании спектральных характеристик оптических потерь и модового состава излучения в антирезонансных световодах с полый сердцевинной диаметром 50 мкм и оболочкой из восьми соприкасающихся капилляров (рис. 1).

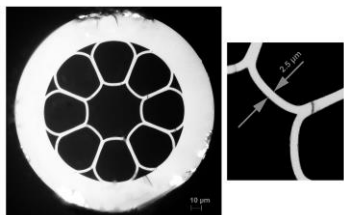


Рис. 1. Изображение поперечного сечения волокна

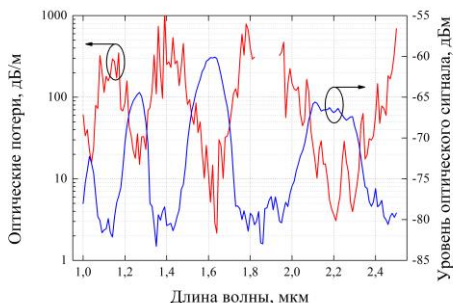


Рис. 2. Спектральная зависимость оптических потерь в волокне

Как видно из рис. 2, спектральная зависимость оптических потерь, рассчитанных с помощью метода конечных элементов, и аналогичная зависимость уровня оптического сигнала, полученного экспериментально с использованием источника широкополосного излучения и оптического спектрометра, для световодов рассматриваемой конструкции однозначно свидетельствуют о наличии окон прозрачности вблизи длин волн 1,25, 1,65 и 2,2 мкм. Измеренные значения оптических потерь составили 15 и 8 дБ/м на длинах волн 1,25 и 1,65 мкм соответственно.

Результаты исследований показали, что модовый состав световодов представлен фундаментальной модой с близким к гауссовому профилю интенсивности в каждом из окон прозрачности.

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. Chen Y., Saleh M.F., et. al. // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 1285-1288.

С.Е. АГАФОНОВА^{1,2}, А.С. ВОЛОШИН¹, А.С. ГОРОДНИЦКИЙ^{1,2},
А.Е. ШИТИКОВ^{1,3}, М.Л. ГОРОДЕЦКИЙ^{1,3}

¹*Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл.*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ЭФФЕКТ ЗАТЯГИВАНИЯ И ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ГРЕБЁНОК В ИНТЕГРАЛЬНОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Мы демонстрируем сужение спектра многочастотного лазерного диода благодаря эффекту затягивания и генерацию оптических гребёнок в интегральном микрорезонаторе из нитрида кремния. Полученный нами результат позволяет значительно уменьшить размеры и стоимость генераторов оптических гребёнок.

S.E. AGAFONOVA^{1,2}, A.S. VOLOSHIN¹, A.S. GORODNITSKIY^{1,2},
A.E. SHITIKOV^{1,3}, M.L. GORODETSKY^{1,3}

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow region*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

³*Lomonosov Moscow State University*

SELF-INJECTION LOCKING AND FREQUENCY COMB GENERATION IN CHIP-SCALE Si₃N₄ MICRORESONATOR

We demonstrate the narrowing of multi-frequency diode laser spectra via self-injection locking and frequency comb generation in chip-scale Si₃N₄ microresonator. The result obtained allows for significant reduction in size and price of frequency comb generators.

Оптические частотные гребёнки используются в прецизионной спектроскопии, калибровке астрофизических спектрометров, телекоммуникациях и синтезе оптических частот. Перспективной платформой для их получения стали микрорезонаторы с модами шепчущей галереи [1]. Их малый размер допускает создание миниатюрных устройств с шумовыми характеристиками современных прецизионных инструментов.

В экспериментах по генерации оптических гребёнок в микрорезонаторах (керровских гребёнок) используются узкополосные одночастотные лазеры, которые весьма габаритны. Это обстоятельство

обесценивает малый размер микрорезонаторов. В этой работе для накачки используется миниатюрный многочастотный диодный лазер. Благодаря эффекту затягивания он преобразуется в одночастотный источник, который затем используется для получения маломощной гребёнки. Такая замена уменьшает размер и стоимость установки.

В этой работе мы использовали чип, описанный в статье [2]. Он представляет собой набор волноводов, связанных с микрорезонаторами из нитрида кремния с ОСД 1 ТГц. Для накачки использовался многомодовый диодный лазер, спектр которого изображён на рис. 1. Его мощность равна 100 мВ, а ширина линии составляет 10 МГц. Спектр излучения лазера после прохождения через микрорезонатор представлен на рис. 2. Видно, что лазер превращается в одночастотный источник с узкой линией: наблюдается эффект затягивания. Методом гетеродинарования было установлено, что порядок ширины линии затянутого лазера равен 100 кГц.

Затянутый лазер служит накачкой для керровской оптической гребёнки в том же микрорезонаторе. Мы наблюдали различные стадии образования гребёнки, в том числе с оптическим спектром с огибающей $\psi(\omega) = p_1 \operatorname{sech}^2((\omega - p_2)/p_3)$ и низким радиоволновым шумом, указывающими на солитонное состояние [3].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №17-12-01413).

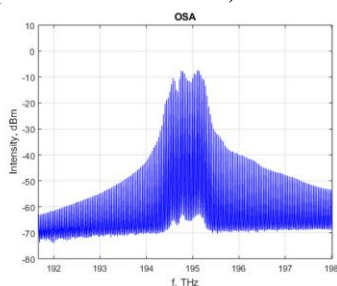


Рис. 1. Исходный спектр используемого лазера

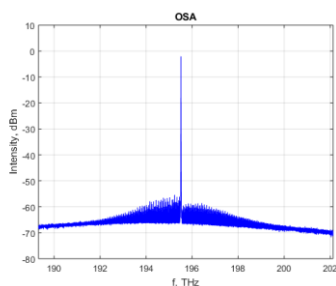


Рис. 2. Спектр диодного лазера в режиме затягивания

Список литературы

1. Del'Haye P., Schliesser A., Arcizet O., Wilken T., Holzwarth R., Kippenberg T.J. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator // *Nature*. 2007. V. 450 (7173). P. 1214.
2. Pfeiffer M.H.P., et. al. Octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in Si_3N_4 microresonators // *Optica*. 2017. V. 4. Is. 7. P. 684-691,
3. Herr T., Brasch V., Jost J.D., Wang C.Y., Kondratiev N.M., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J. Temporal solitons in optical microresonators // *Nat. Photonics*. 2014. V. 8. P. 145-152.

Г.С. СОФИЕНКО, А.А. КОЛЕГОВ, А.В. ЗАГИДУЛИН,
А.В. БОЧКОВ, В.А. НЕСТЕРОВ

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

ВОЛОКОННЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены результаты разработки волоконных одночастотных лазеров для интерферометрических измерений по гетеродинным схемам и схемам с частотным уплотнением каналов. Ширина спектральной линии излучения лазера менее 5.4 кГц, мощность излучения до 2 Вт. В двухканальном лазере для схем с частотным уплотнением реализована регулируемая отстройка частот до 10 ГГц. Стабилизация разностной частоты в каналах осуществляется оптической обратной связью с точностью ± 15 МГц.

G.S. SOFIENKO, A.A. KOLEGOV, A.V. ZAGIDULIN,
A.V. BOCHKOV, V.A. NESTEROV

*Zababakhin All-Russian Scientific-Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk,
Chelyabinsk region*

SINGLE FREQUENCY FIBER LASER FOR INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS

Presents the result of development of single frequency fiber lasers for interferometric measurements using PDV and MPDV methods. Spectral bandwidth of the laser emission is less than 5.4 kHz, power of laser emission is 2 W. The laser for MPDV method has frequency tuning up to 10 GHz between the channels. Stabilization of the difference frequency in the channels is carried out by optical feedback with an accuracy of ± 15 MHz.

Одночастотные волоконные лазеры являются востребованными источниками излучения для таких приложений как когерентные оптические датчики, спектрометры высокого разрешения, источники излучения в прецизионных физических экспериментах и др. В частности, такие лазеры используются в интерферометрических комплексах при исследовании быстротекущих процессов по лазерно-гетеродинной методике измерений (ЛГ).

Одночастотный лазер собран по схеме задающий генератор – усилитель. В качестве задающего генератора использовался

разработанный одночастотный кольцевой волоконный лазер с мощностью излучения до 40 мВт [1-3]. Контроль ширины спектра проводится с помощью разработанного кольцевого волоконного интерферометра с длиной линии задержки 850 м, областью свободной дисперсии FSR – 233 кГц и аппаратной функцией 5.4 кГц [4]. Измерения показывают, что спектральная ширина линии лазера составляет менее 5.4 кГц.

Грубая стабилизация частоты лазерного излучения осуществляется температурной стабилизацией задающего генератора, при этом дрейф частоты лазерного излучения составляет до 200 МГц/час. Для повышения стабильности частоты излучения лазера, было разработано устройство, осуществляющее оптическую обратную связь в схеме лазера. Обратная оптическая связь осуществляется при смешении излучения лазера с излучением эталонного источника. В одноканальном лазере контролируется частота биения между эталонным когерентным источником, например, дешевым одночастотным диодом с шириной спектральной линии несколько десятков мегагерц и перестраиваемым каналом лазера. В двухканальном лазере реализуется непосредственный контроль частоты биения в двух независимых каналах лазера. На рис. 1 представлена измеренная разностная частота в двух каналах лазера при подключении устройства регулировки разностной частоты.

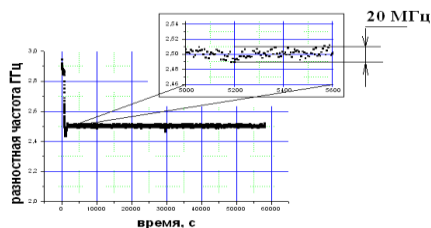


Рис. 1. Разностная частота в двух каналах лазера при включении устройства, осуществляющего обратную оптическую связь

Измерения показывают, что долговременная стабильность разностной частоты при подключении устройства, осуществляющего оптическую обратную связь, составляет ± 15 МГц за время наблюдения более 15 часов.

Список литературы

1. Колегов А.А., Софиенко Г.С., Бочков А.В., Минашина Л.А. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44 (1). С. 13-16.
2. Патент на изобретение RU2554337.
3. Патент на изобретение RU2664758.
4. Софиенко Г.С., Колегов А.А., Бочков А.В. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 3. С. 89-92.

В.Ф. ЛЕБЕДЕВ^{1,2}, К.В. ПАВЛОВ²,
Г.В. БУРКОВСКИЙ³, А.В. ФЕДИН³

¹*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

³*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

КОМПАКТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЛИЭС НА ОСНОВЕ Nd:YAG-ЛАЗЕРА С САМООБРАЩЕНИЕМ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Предложена компактная лазерная система на основе Nd:YAG-лазера с самоОВФ для дистанционного анализа веществ методом ЛИЭС на расстоянии не менее десяти метров.

V.F. LEBEDEV^{1,2}, K.V. PAVLOV², G.V. BURKOVSKIY³, A.V. FEDIN³

¹*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

²*ITMO University, Saint-Petersburg*

³*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs*

COMPACT LASER SYSTEM BASED ON A Nd:YAG-LASER WITH SELF-PHASE CONJUGATION FOR REMOTE MEASUREMENTS BY THE LIBS-METHOD

Compact laser system based on Nd:YAG-laser with self-phase conjugation for remote analysis of substances at least ten meters distance by the LIBS-method was proposed.

ЛИЭС-система реализует один из наиболее перспективных методов дистанционного химического анализа веществ в любом агрегатном состоянии, и в ее составе наиболее часто используется коммерческий лазер с ламповой накачкой и линейным резонатором [1]. В настоящей работе впервые предлагается лазерная система (рис. 1) с высокими энергетическими и пространственными характеристиками лазерного излучения для дистанционных измерений методом ЛИЭС на основе малогабаритного импульсного Nd:YAG-лазера с полупроводниковой накачкой и самообращением волнового фронта при многоволновом взаимодействии в активной (усиливающей) среде и пассивном лазерном затворе (ПЛЗ). Лазер данного типа может переходить

в режим генерации коротких импульсов с помощью внешнего плазменного зеркала, образованного лазерной плазмой исследуемого методом ЛИЭС материала.

Энергия лазерного импульса и его длительность составили 230 мДж и 11 нс соответственно, а число импульсов в цуге могло изменяться от 1 до 11. Значение параметра качества пучка не превышало $M^2 \leq 1.2$ [2].

Важной частью современных алгоритмов обработки спектров в ЛИЭС-методе является вычисление относительного вклада полосы излучения исследуемого химического элемента в полный спектр излучения плазмы, то есть его нормализация. Алгоритм обработки спектров с применением процедуры нормализации после каждого импульса становится более устойчивым в условиях существенной нестационарности параметров лазерного факела от импульса к импульсу, связанной с варьированием температуры лазерного факела, непостоянством его пространственного положения и т.д. [3].

Высокое качество пучка излучения самоОВФ-лазера в сочетании с его высокой пространственной яркостью (7×10^{14} Вт/см²/ср) позволили провести измерения и автоматическую идентификацию материалов методом ЛИЭС на расстояниях до 10 м.

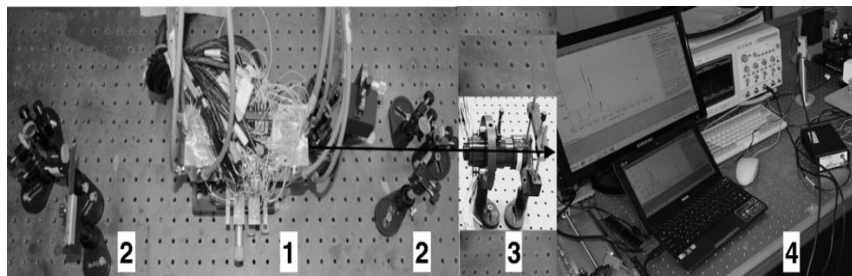


Рис. 1. ЛИЭС- система на основе Nd:YAG-лазера с самоОВФ:

1 - квантрон; 2 - зеркала; 3 - фокусирующая система;

4 - система регистрации, обработки спектров и управления лазером

Список литературы

1. Musazzi S., Perini U. Laser-induced breakdown spectroscopy. NYC: Springer, 2014.
2. Бурковский Г.В., Федин А.В., Погода А.П., Борейшо А.С. // КЭ. 2016. Т. 46. С. 976.
3. Lebedev V.F., Makarchuk P.S., Stepanov D.N. // Spectr. Acta Part B. 2017. V. 137. P. 23.

А.Е. ШИТИКОВ^{1,2}, В.Е. ЛОБАНОВ¹, Р.В. ТЕРЕНТЬЕВ^{1,2},
И.А. БИЛЕНКО^{1,2}, М.Л. ГОРОДЕЦКИЙ^{1,2}

¹*Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл.*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАТИКОНОВ

Методики генерации оптический гребенок в микрорезонаторах в области нормальной ДГС были проверены экспериментально. Впервые экспериментально реализована генерация гребенок в области нормальной дисперсии групповых скоростей (ДГС) с использованием двухчастотной накачки, выявлены характерные режимы генерации. В режиме затягивания были получены платиконоподобные спектры с узким сигналом биений.

A.E. SHITIKOV^{1,2}, V.E. LOBANOV¹, R.V. TERENCEV^{1,2},
I.A. BILENKO^{1,2}, M.L. GORODETSKY^{1,2}

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow region*

²*Lomonosov Moscow State University*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PLATICONS GENERATION METHODS

The methods of optical frequency combs generation in microresonators in normal GVD were experimentally verified. The generation of combs in normal group velocity dispersion (GVD) using bichromatic pumping was observed experimentally for the first time, two different generation regimes were explained. Platonic-like spectra with a narrow beat signal were obtained with using self-injection locking effect.

Микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ) могут обладать сверхвысокими добротностями в оптическом диапазоне ($> 10^9$), что позволяет использовать их для практической реализации многих интересных нелинейных эффектов, в том числе и для генерации керровских частотных гребенок [1].

Особый интерес представляют когерентные частотные гребенки. В области аномальной дисперсии групповых скоростей такие гребенки были получены в виде диссипативных керровских солитонов [2, 3] и к настоящему времени было разработано множество вариантов их практического применения для решения научных и прикладных задач. Однако большинство материалов (например, широко используемые MgF_2 ,

CaF_2), пригодных для изготовления микрорезонаторов МШГ, имеют нормальную дисперсию групповых скоростей (ДГС) в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Ранее было показано, что в области нормальной ДГС когерентные частотные гребенки могут быть реализованы в виде солитоноподобных импульсов особой формы, платиконов [4]. Также было показано, что генерация платиконов в несколько раз эффективнее с точки зрения преобразования энергии накачки в энергию гребенки по сравнению с солитонами в области аномальной ДГС, что имеет особенное значение для многих практических приложений.

За последние годы было предложено несколько способов для реализации условий для генерации платиконов: использование локального дефекта дисперсии, вызванного взаимодействием мод [4], использование модуляции накачки на частоте, равной области свободной дисперсии (ОСД) или на ее субгармониках, или двухчастотной накачки с частотным расстоянием равным ОСД [5], использование затягивания частоты лазера микрорезонатором. В основном исследование свойств платиконов и методов их генерации ограничивалось численным моделированием [4-6].

В работе использовались высокодобротные ($> 10^9$) резонаторы из MgF_2 . На длине волны 1064 нм были получены оптические гребенки за счет эффекта взаимодействия мод: 20 спектральных линий на частотном расстоянии 2 ОСД микрорезонатора друг от друга и 40 спектральных линий на расстоянии 1 ОСД. На той же длине волны были продемонстрированы гребенки с использованием двойной накачки. Были выявлены характерные режимы генерации: «мягкий режим», вторая накачка используется для поддержания генерации, «жесткий режим», вторая накачка используется для затравки каскадного процесса. Также были получены различные гребенки с использованием эффекта затягивания диодного лазера 780 нм на микрорезонатор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-02-00522).

Список литературы

1. Herr T., et. al. // Nat. Photon. 2012. № 6, P. 480-487.
2. Lobanov V.E., et. al. // Opt. Exp. 2016. V. 24, № 24. P. 27382-27394.
3. Pavlov N.G., et.al. // Opt. Lett. 2017. V. 42, № 3. P. 514-517.
4. Lobanov V.E., et. al. // Opt. Exp. 2015. V. 23, № 6. P. 7713-7721.
5. Lobanov V.E., Lihachev G., Gorodetsky M.// Europhys. Lett. 2015. V. 112, № 5. P. 54008.
6. Lobanov V.E., et. al. // Eur. Phys. J. D. 2017. V. 71, № 7. P. 2017.

О.А. БУРДУКОВА^{1,2}, С.М. ДОЛОТОВ³, В.А. ПЕТУХОВ^{1,2},
М.А. СЕМЕНОВ²

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

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

³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ПОЛИМЕРНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С НАКАЧКОЙ 520 нм ЛАЗЕРНЫМИ ДИОДАМИ

В данной работе представлены результаты экспериментов по эффективной квазипродольной накачке полимерного лазера на красителях зелеными ($\lambda = 520$ нм) полупроводниковыми лазерами. В трехзеркальном резонаторе с компенсацией астигматизма был получен КПД свыше 20 % на красителях пиррометен 567 и пиррометен 580.

O.A. BURDUKOVA^{1,2}, S.M. DOLOTOV³, V.A. PETUKHOV^{1,2},
M.A. SEMENOV²

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

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

POLYMER DYE LASER PUMPED BY 520 nm DIODES

We present the results of experiments on the effective quasi-longitudinal pumping of the polymer dye laser by green ($\lambda = 520$ nm) diode lasers. The best obtained efficiency was approximately 20 % for pyrromethenes 567 and pyrromethenes 580 in the astigmatically compensated three-mirror cavity.

Мировым трендом последних лет стал перевод лазеров разного типа на накачку полупроводниковыми лазерными диодами. Этому способствовал прогресс в разработке мощных диодных лазеров видимого диапазона на нитриде галлия. Фирма Nichia выпускает голубые диоды 445 нм, 3,5 Вт, что позволило значительно поднять КПД (почти до 9 %) твердотельных лазеров на красителях с диодной накачкой [1]. Недавно Nichia освоила выпуск зеленых лазеров 520 нм, 1 Вт. Это позволило нам осуществить прорыв в накачке полупроводниковыми лазерами лазеров на растворах красителей и достичь КПД более 25 % [2].

Данная работа посвящена исследованию генерационных характеристик и фотостабильности наиболее эффективных лазерных

красителей – пиррометенов (ПМ) в различных полимерных матрицах. Мы использовали импульсную (длительность – 200 нс, частота – 2 Гц) квазипродольную накачку двумя многомодовыми InGaN-диодами (520 нм). Активные элементы представляют собой триплексы стекло/полимер/стекло (2.6/0.07-0.11/2.6 мм). Оптимальная оптическая плотность $D = 1.9-2.1$. Пороговые энергии генерации составили 0.29-0.37 мкДж при пропускании выходного зеркала $T = 13\%$. Дифференциальный КПД для различных полимерных матриц составил 31-43% (рис. 1). Наилучшие результаты были получены при использовании полимерной матрицы: поливинилбутираль, пластифицированный 20-30% об. дибутилсебацианата. Лучшую фотостойкость показал ПМ597, для него энергия генерации падает вдвое за 1.7×10^4 импульсов в одну точку при накачке 0.75 мкДж. ПМ567 и ПМ580 демонстрируют КПД более 20%, что довольно близко к значениям КПД в этаноле (EtOH). Таким образом, наша работа демонстрирует, что мощные зеленые диоды могут использоваться для эффективной накачки твердотельных лазеров на красителях.

Работа была выполнена при поддержке программы Президиума РАН I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

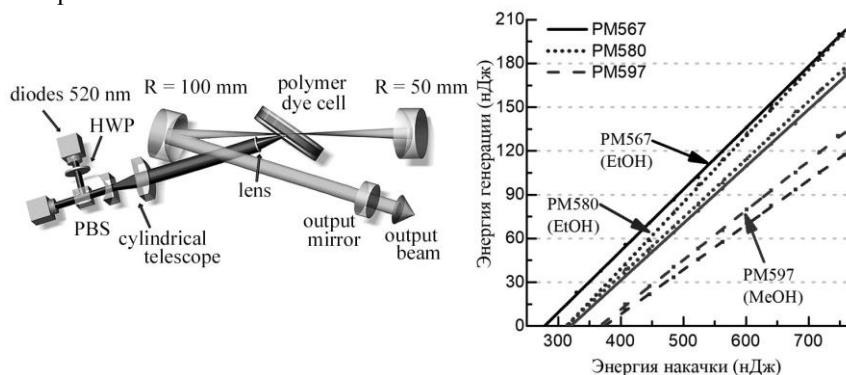


Рис. 1. Экспериментальная схема (слева); зависимости энергии генерации от поглощенной энергии накачки для красителей в растворах (указаны стрелками EtOH, MeOH) и в полимере (справа)

Список литературы

1. Zhao Z., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 051112.
2. Burdukova O.A., et. al. // Appl. Phys. B. 2018. V. 124. P. 188.

М.А. БАСТАМОВА¹, С.О. ЛЕОНОВ¹, Н.В. СИДОРОВ³,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ³, В.С. ГОРЕЛИК^{1,2}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

³Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КЕРАМИКЕ LiTaO₃

Исследована эффективность нелинейных преобразований в керамике LiTaO₃. Получена генерация второй оптической гармоники в двух образцах керамики LiTaO₃ с содержанием лития 48,8 и 49,3 %. В качестве источника излучения использовался фемтосекундный лазер на длине волны 1,026 мкм.

M.A. BASTAMOVA¹, S.O. LEONOV¹, N.V. SIDOROV³,
M.N. PALATNIKOV³, V.S. GORELIK^{1,2}

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region

NONLINEAR MODIFICATION OF FEMTOSECOND RADIATION IN LiTaO₃ CERAMICS

The nonlinear modification efficiency in LiTaO₃ ceramics is investigated. The second optical harmonic generation in two samples of LiTaO₃ ceramics with a lithium content of 48.8 and 49.3% was obtained. The femtosecond laser at wavelength 1.026 μm was used as a radiation source.

Керамика, керамические стекла, и различные порошки могут заменить нецентросимметричные кристаллы, которые в настоящее время используются для нелинейных преобразований лазерного излучения, в частности генерации второй оптической гармоники [1]. Данные материалы обладают преимуществом из-за того, что не требуется пространственная ориентация или структурирование образца для оптимизации эффективности генерации второй гармоники [2]. Одним из недостатков рассматриваемых материалов является то, что преобразованное излучение не обладает направленностью, из-за структуры вещества, оно рассеивается во всех направлениях [3], что

затрудняет измерение интегральной мощности преобразованного излучения.

В данной работе мы представляем метод, который позволяет измерить интегральную мощность рассеянного излучения второй гармоники. В основе данного метода лежит применение интегральной сферы [4].

Исследованы два образца керамики LiTaO_3 с разным содержанием лития (49,3 и 48,8 %). В качестве источника излучения использовался фемтосекундный Yb:KGW -лазер с длительностью импульса ≈ 250 фс, центральной длиной волны 1,026 мкм, частотой повторения 200 кГц и средней мощностью до 3 Вт. Для интегрирования рассеянного излучения от исследуемого образца использовалась интегрирующая сфера (рис. 1а). Была измерена зависимость мощности второй гармоники от пиковой мощности лазера накачки в трех участках для каждого образца (рис. 1б, в)

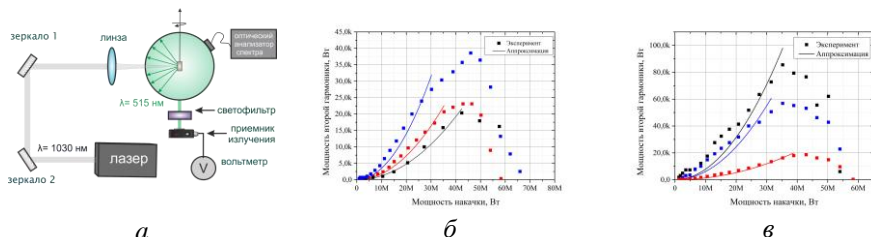


Рис. 1. Экспериментальная установка (а); зависимости мощности второй гармоники для образца с содержанием лития 48,8 % (б) и 49,3 % (в)

Полученные экспериментальные зависимости согласуются с квадратичной зависимостью, что подтверждает нелинейный характер процесса преобразования лазерного излучения. При приложении излучения накачки больше 35 МВт поверхностный слой образцов разрушался, в результате сигнал второй гармоники снижался. Эффективности нелинейного преобразования излучения во вторую гармонику составили 0,242 и 0,083 % для образцов с содержанием лития 49,3 и 48,8 % соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00495.

Список литературы

1. Gorelik V.S., et. al. // Journal of Russian Laser Research. 2016. V. 37(3). P. 254-258.
2. Sánchez-Dena O., et. al. // Materials Research Express. 2017. V. 4(3). P. 035022.
3. Aramburu I., Ortega J., Folcia C.L., Etxebarria J. // Applied Physics Letters. 2014. V. 104 (7). P. 071107.
4. Carr K.F. Labsphere Technical Guide. 1997.

В.С. ЖИГАРЬКОВ, В.П. ЗАРУБИН¹, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ
*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

ЭФФЕКТЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫЖИВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНИЗМОВ, ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАЗЕРНОЙ ПЕЧАТИ ГЕЛЕВЫХ МИКРОКАПЕЛЬ

Технология лазерной печати ЛИМС (лазерная инженерия микробных систем) относится к биофизическим методам, направленным на повышение разнообразия труднокультивируемых и некультивируемых микроорганизмов. Для совершенствования технологии необходимо минимизировать ряд негативных для живых систем факторов, возникающих при взаимодействии мощного импульсного электромагнитного излучения со слоем металла. В работе изучены процессы переноса металлических частиц и с помощью методов оптоакустики оценены амплитуды температур и давлений, возникающих при образовании гелевых микроструй.

V.S. ZHIGARKOV, V.P. ZARUBIN¹, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV
Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and photonics» RAS, Troitsk
¹*National University of Science and Technology MISIS, Moscow*

EFFECTS AFFECTING SURVIVAL OF BIOLOGICAL ORGANISMS IN LASER PRINTING OF GEL MICRO-DROPLETS

Technology of laser printing LEMS (laser engineering of microbial systems) is one of the biophysical methods developed for search of unknown hardly cultivated and non-cultivated microorganisms. For improvement of this technology minimization of negative factors emerging due to a process of interaction of powerful laser pulsed radiation with metal layer is required. Within the current work processes of metallic particles transfer are studied and methods of optoacoustics are used for estimation of amplitudes of temperature and pressure, emerging in gel jets.

В основе технологии ЛИМС лежит индуцированный лазерным импульсным излучением перенос вещества, в качестве которого может выступать носитель микроорганизмов, например, мелкие частички различных почв [1]. В экспериментальной установке (рис. 1) использовался иттербиевый волоконный лазер YLPM-1-4*200-20-20 (длина волны $\lambda = 1064$ нм, длительность импульса $\tau = 1-200$ нс, энергия в

импульсе до 1 мДж). Лазерное излучение фокусировалось на тонком поглощающем слое на стеклянной подложке с нанесённым слоем геля. Поглощенное в металлической пленке импульсное лазерное излучение приводит к резкому нагреванию материала плёнки и слоя геля, в результате чего происходит частичное испарение плёнки и генерация в результате термокавитации микропузырька и микроструи жидкости [2]. Образовавшиеся на приёмной подложке микрокапли имеют малый объем и могут содержать единичные носители микроорганизмов, что значительно повышает вероятность выделения одного вида бактерий. Однако во время протекания описанных процессов температуры и давления в области воздействия лазерного излучения достигают экстремально высоких значений, что наряду с выбросом металлических частиц в результате абляции может привести к повреждениям микроорганизмов [3, 4]. Амплитуды давлений при разных длительностях и энергиях лазерных импульсов оценены методом оптоакустики с помощью экспериментальной установки, схема которой изображена на рис. 2. Полученные закономерности развивающихся температур и давлений позволяют оптимизировать технологию ЛИМС.

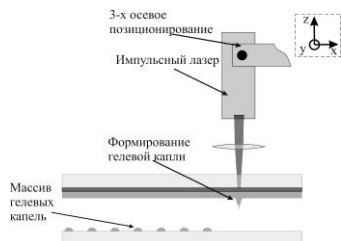


Рис. 1. Схема установки

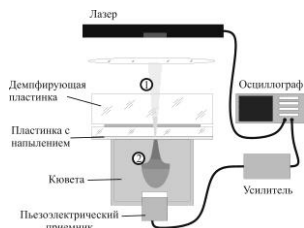


Рис. 2. Схема для регистрации акустического импульса

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и грантов РФФИ 18-32-00607 и 18-29-06056.

Список литературы

1. Yusupov V.I., et. al. // Laser Physics Letters. 2018. V. 15 (6). P. 065604.
2. Yusupov V.I., et. al. // Quantum Electronics. 2017. V. 47 (12). P. 1158.
3. Rostami A. et. al. // Advances in Nanobiotechnology. 2018. V. 1 (1). P. 9-15.
4. Mordorski B., et. al. // Functionalized Nanomaterials for the Management of Microbial Infection. 2017. P. 77-109.

В.Г. СЕМЕНОВ, Э.А. МИЛИКОВ, А.Д. МОРОЗОВ,
А.Б. ТАРАСЕНКО

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

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕЕМАНОВСКОГО ЧЕТЫРЕХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) ряда серийных и экспериментально изготовленных лазерных гироскопов, в том числе четырехчастотных. Изучено влияние геометрических параметров корпуса непланарного резонатора лазерного гироскопа, размера электродов и состава газовой смеси на параметры газового разряда. Выявлены оптимальные параметры для снижения тепловыделения, минимизации влияния токового дрейфа и повышения стабильности четырехчастотного лазерного гироскопа.

V.G. SEMENOV, E.A. MILIKOV, A.D. MOROZOV,
A.B. TARASENKO

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

INFLUENCE OF INTERNAL PARAMETERS OF FOUR-FREQUENCY ZEEMAN LASER GYRO ON CHARACTERISTICS OF GAS DISCHARGE

Presents the result of investigation of current-voltage characteristics of a number of serial produced and experimentally manufactured laser gyros, including four-frequency gyros. The influence of the geometrical parameters of the case, of the size of electrodes and of the composition of the gas on the parameters of the gas discharge in non-planar laser gyro was studied. The optimal parameters for reducing heat generation, minimizing the effect of current drift and increasing the stability of a four-frequency laser gyroscope were revealed.

Лазерные гироскопы с зеемановской частотной подставкой обладают рядом преимуществ по сравнению с гироскопами с виброподвесом – отсутствием вибраций и механических подвижных частей, а значит и устойчивостью к механическим ударам и перегрузкам [1]. Однако такая конфигурация оказывается чувствительной к внешнему магнитному полю [2]. Одним из способов устранения этой зависимости является работа в четырехчастотном режиме [3, 4].

Схема для снятия вольт-амперной характеристики лазерного гироскопа представлена на рис. 1, вольт-амперная характеристика, представляющая из себя зависимость напряжения горения $U_{гор}$ от тока накачки I_n , показана на рис. 2 ($U_в$ – напряжение поджига).

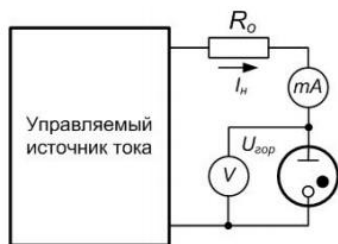


Рис. 1. Схема для снятия вольт-амперной характеристики

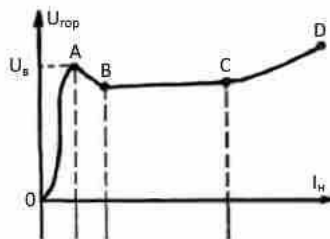


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика лазерного гироскопа

Оптимизация газового разряда позволяет снизить тепловыделение в лазерном гироскопе, а значит уменьшить деформации корпуса вследствие теплового расширения и снизить токовый дрейф, что позитивно сказывается на характеристиках прибора. В работе проведено исследование ВАХ ряда четырехчастотных гироскопов с выявлением соответствующих оптимальных параметров. Среди прочего проведено сравнение ВАХ четырехчастотных гироскопов с аналогичными характеристиками двухчастотных гироскопов с непланарным резонатором.

Полученные результаты могут служить в дальнейшем для создания четырехчастотного лазерного гироскопа с повышенной точностью.

Список литературы

1. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 2. С. 96-104.
2. Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Влияние магнитного поля на дрейф зеемановского лазерного гироскопа // Труды 58-й научной конференции МФТИ. (http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/982.pdf).
3. Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Система формирования сигнала четырехчастотного зеемановского лазерного гироскопа // Труды 59-й научной конференции МФТИ. (http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2693.pdf).
4. Семенов В.Г., Миликов Э.А., Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А. Особенности оптического смесителя излучения кольцевого лазера с непланарным резонатором // Труды 60-й научной конференции МФТИ. Электроника, фотоника и молекулярная физика. М.: МФТИ, 2017. С. 74.

И.Д. АРШИНОВА^{1,2}, А.А. БОБРОВ¹, Е.В. ВИЛЬШАНСКАЯ^{1,3},
С.А. СААКЯН¹, В.А. САУТЕНКОВ^{1,4}, Б.Б. ЗЕЛЕНЕР^{1,2,3}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ПРИГОТОВЛЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНОГО ГАЗА АТОМОВ КАЛЬЦИЯ-40

Создана установка для получения ультрахолодного газа атомов кальция-40. Определена зависимость концентрации атомов от отстройки частоты пучков в магнитооптической ловушке относительно внутри доплеровского резонанса $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ в красную сторону. Обсуждаются возможные применения ультрахолодных атомов в задачах квантовой информатики.

I.D. ARSHINOVA^{1,2}, A.A. BOBROV¹, E.V. VILSHANSKAYA^{1,3},
S.A. SAAKYAN¹, V.A. SAUTENKOV^{1,4}, B.B. ZELENER^{1,2,3}

¹Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow

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

³National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

⁴Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

PREPARATION OF THE ULTRA COLD GAS OF CALCIUM-40 ATOMS

An experimental setup was constructed for the creation of ultra-cold gas of calcium-40. The concentration of atoms in the magneto-optical trap was determined as a function of the red shift of the beams frequency in the one relative to the sub-Doppler resonance $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$. Possible applications of ultracold atoms in problems of quantum informatics and photonics are discussed.

На сегодняшний день лазерное охлаждение атомов находит широкое применение: в прецизионной лазерной спектроскопии, в синтезе холодных молекул, в создании атомных часов, а также в экспериментах по изучению ультрахолодной плазмы, ридберговского вещества, бозе-эйнштейновских конденсатов атомов и вырожденных ферми газов. Два валентных электрона кальция позволяют получать газ ионизированных атомов и детектировать ионы с помощью второго электрона в оптическом диапазоне.

В качестве источника атомного пучка в работе использовалась печь, в которой металлический кальций нагревался до температуры 800 К. Далее пучок атомов кальция замедлялся в зеемановском замедлителе до скоростей порядка 30 м/с и захватывался в магнитооптическую ловушку (МОЛ). Для получения достаточного количества атомов в установке поддерживался вакуум на уровне 10^{-9} - 10^{-10} Торр. В качестве охлаждающего пучка использовался лазер с длиной волны 423 нм и мощностью 800 мВт. Существует конечная вероятность того, что атомы из состояния $3d4s\ ^1D_2$ распадутся в метастабильное состояние $4s4p\ ^3P_2$ с временем жизни 118 минут [1]. Использование оптической накачки с длиной волны 672 нм и мощностью 20 мВт позволило вернуть значительную часть атомов в цикл охлаждения и, тем самым, увеличить концентрацию атомов в МОЛ (рис. 1).

Частота зеемановского луча смещалась в красную сторону на 237 МГц путем изменения тока накачки охлаждающего лазера. С помощью изменения частоты тока, подаваемого на акустооптический модулятор, осуществлялось управление отстройкой частоты охлаждающих пучков МОЛ. Таким образом получена зависимость концентрации атомов кальция в облаке от отстройки пучков МОЛ. На рис. 2 представлена данная зависимость для двух значений градиента поля: 26 и 36 Гс/см. Наибольшая концентрация атомов достигается при градиенте 36 Гс/см и отстройке охлаждающего излучения порядка 50 МГц в красную сторону и составляет $2,3 \cdot 10^9\ \text{см}^{-3}$.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума Российской академии Наук «Исследование вещества в экстремальных состояниях» под руководством академика Фортова В.Е.

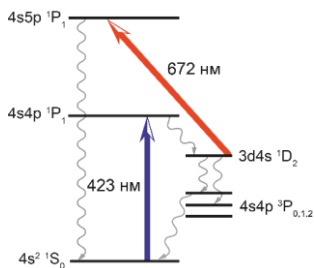


Рис. 1. Схема энергетических уровней атома кальция-40

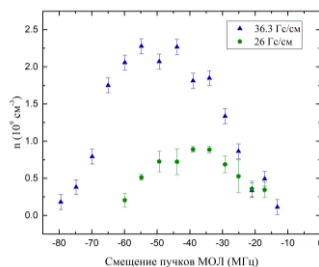


Рис. 2. Зависимость концентрации атомов от отстройки пучков МОЛ

Список литературы

1. Derevianko A. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 023002.

А.А. ЗЕМЛЯНОВ^{1,2}, А.В. ТРИФОНОВА¹, Р.В. РЯМБОВ¹
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НА ПОРОГИ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ Au, Ag, Pt

Экспериментально показано, что пороги безрезонаторной лазерной генерации в растворах красителей с наночастицами практически совпадают. Избыточная энергия, полученная благодаря плазмонному резонансу, не влияет на понижение порогов лазерной генерации, а затрачивается на нагревание наночастиц.

A.A. ZEMLYANOV^{1,2}, A.V. TRIFONOVA¹, R.V. RYAMBOV¹
¹National Research Tomsk State University
²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

EFFECT OF PLASMON RESONANCE ON THE THRESHOLD OF LASER GENERATION IN AN ACTIVE MEDIUM WITH Au, Ag, Pt

It was experimentally shown that the thresholds of resonatorless lasing in dye solutions with nanoparticles almost coincide. The excess energy obtained due to plasmon resonance does not affect the reduction of lasing thresholds, but is spent on heating the nanoparticles.

В настоящее время принято считать, что безрезонаторная лазерная генерация в рассеивающей усиливающей среде реализуется либо за счет увеличения времени взаимодействия фотонов вторичного излучения с молекулами активного вещества, либо за счет эффекта плазмонного резонанса. В мировой научной литературе [1] утверждается, что при выполнении условий эффекта плазмонного резонанса вблизи наночастицы увеличивается плотность мощности поля падающей волны. Но в результате проведения экспериментальных работ мы выявили следующее: пороги лазерной генерации в растворах красителей с наночастицами практически совпадают. Это явление предположительно можно объяснить тем, что в условиях реализации плазмонного резонанса кинетическая энергия электронного газа в наночастице увеличивается, при столкновении с атомами наночастицы электронный газ передает им часть энергии, которая «нагревает» наночастицу. Следовательно, давление в

этой нагретой области вблизи наночастицы изменяется и может приводить к возникновению акустических сигналов и разрушению среды, после которого генерация прекратится. Серия экспериментов проводилась на установке, представленной на рис. 1.

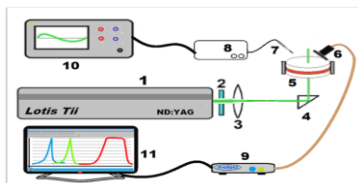


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер, 2 - фильтр СЗС-25, 3 - фокусирующая линза, 4 - призма полного внутреннего отражения, 5 - кювета, 6 - входное окно приемной системы, 7 - микрофон, 8 - усилитель, 9 - спектрометр, 10 - осциллограф, 11 - ПК

Полученные зависимости пороговой энергии генерации от концентрации наночастиц Au, Ag, Pt представлены на рис. 2. Пороги генерации для всех видов наночастиц практически совпадают.

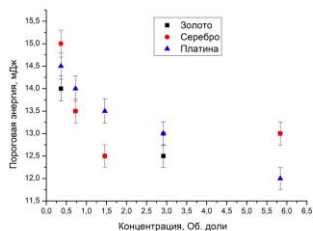


Рис. 2. Зависимости пороговой энергии генерации от концентрации наночастиц

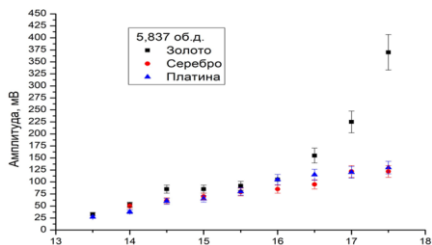


Рис. 3. Зависимости амплитуды акустических сигналов от энергии накачки

Зависимости амплитуд акустических сигналов от энергии накачки растворов с наночастицами Au, Ag, Pt приведены на рис. 3. Кривая амплитуды акустического сигнала для наночастиц золота выше, чем кривая амплитуды акустического сигнала для наночастиц серебра и платины. Возрастание амплитуды акустического сигнала говорит о том, что наночастицы Au нагрелись сильнее, чем наночастицы Ag и Pt, что приводит к вскипанию раствора с наночастицами Au.

Список литературы

1. Зуев В.С., Франценссон А.В. Наноструктуры в лазерном эксперименте // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 2. С. 120-126.

Е.А. ВИШНЯКОВ¹, А.О. КОЛЕСНИКОВ^{1,2}, Е.Н. РАГОЗИН¹,
А.Н. ШАТОХИН^{1,2}

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

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный

VLS-СПЕКТРОМЕТРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты численных расчётов и экспериментальной реализации мягкого рентгеновского спектрометра на основе плоской VLS-решётки для спектрального диапазона 125-250 Å. В зарегистрированных спектрах излучения лазерной плазмы ионов Li, F и Mg, полученных с пространственным разрешением, наблюдается спектральная разрешающая способность ~ 1000 и пространственное разрешение 26 мкм. Обсуждаются другие варианты схем VLS-спектрометров.

E.A. VISHNYAKOV¹, A.O. KOLESNIKOV^{1,2}, E.N. RAGOZIN¹,
A.N. SHATOKHIN^{1,2}

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny

HIGH-RESOLUTION VLS-SPECTROMETERS FOR SOFT X-RAY RADIATION

We present the results of numerical simulations and experimental implementation of a soft X-ray spectrometer based on a flat VLS grating for the 125-250 Å spectral range. In the recorded spatially resolved spectra of Li, F and Mg laser plasma ions emission, the spectral resolving power of ~ 1000 and the spatial resolution of 26 μm are revealed. Different options for VLS-spectrometers layouts are discussed.

В последнее время в спектральных приборах высокого разрешения для мягкого рентгеновского (МР) излучения часто используются отражающие дифракционные решётки с переменным шагом штриха, или Varied Line Space (VLS) решётки [1]. Впервые о способности VLS-решётки изменять расстояние до спектральной фокальной кривой сообщил Корню в 1893 [2].

Зависимость густоты штрихов VLS-решётки от координаты w по её апертуре можно записать в виде полиномиального ряда:

$$p(w) = p_0 + p_1w + p_2w^2 + p_3w^3 + \dots \quad (1)$$

Свойства VLS-решётки определяются коэффициентами полинома (1). В частности, коэффициент p_0 определяет направление центрального луча

дифракции, p_1 модифицирует спектральную фокальную поверхность, p_2 позволяет компенсировать aberrацию меридиональной комы на одной выбранной длине волны, а p_3 – компенсировать сферическую aberrацию.

Возможность модифицировать спектральную фокальную поверхность и компенсировать aberrации при помощи VLS-решёток позволяет на их основе создавать спектральные приборы более высокого разрешения, чем на основе классических дифракционных решёток. Нами был рассчитан ряд спектрометров высокого разрешения на базе вогнутой VLS-решётки для вакуумного ультрафиолетового [3] и МР [4] спектральных диапазонов.

На основе плоской VLS-решётки и вогнутого многослойного зеркала мы создали изображающий спектрометр МР диапазона, позволяющий получать стигматические спектральные изображения одновременно со спектральным разрешением по горизонтальной оси и с пространственным разрешением по вертикальной оси (рис. 1). В экспериментах были зарегистрированы спектры излучения лазерной плазмы, образованной при облучении мишеней из LiF и Mg импульсами наносекундного ИК-лазера ($E_{\text{имп}} = 0.5$ Дж, 1064 нм, 8 нс). Прибор был реализован на основе разных VLS-решёток: первая была изготовлена методом электронной литографии в МФТИ, г. Долгопрудный [5], а вторая – методом интерференционной литографии в ГИПО, г. Казань [6]. Обе реализации прибора позволили осуществить пространственное разрешение 26 мкм и спектральную разрешающую способность ~ 500 в первом случае и ~ 1000 во втором.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00506).

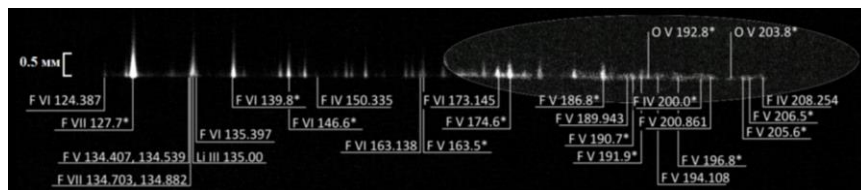


Рис. 1. Стигматический спектр излучения плазмы ионов Li, F и O с разрешением ~ 500

Список литературы

1. Vishnyakov E.A., Kolesnikov A.O., et. al. // Quantum Electronics 2018. V. 48 (10). P. 916.
2. Cornu M.A. // Comptes Rendus Acad. Sci. 1893. V. 117 (26). P. 1032-1039.
3. Вишняков Е.А., Колесников А.О. и др. // Оптика и спектроск. 2018. Т. 125 (5). С. 687.
4. Vishnyakov E.A., Kolesnikov A.O., et. al. // Quantum Electronics. 2016. V. 46 (10). P. 953.
5. Kolesnikov A.O., Kuzin A.A., et. al. // Springer Proc. in Phys. 2018. V. 202. P. 389.
6. Shatokhin A.N., Kolesnikov A.O., et. al. // Optics Express 2018. V. 26 (15). P. 19009.

В.А. КОМОЦКИЙ, Ю.М. СОКОЛОВ, Н.В. СУЕТИН,
Х.А. ПАУЙАК¹

Российский университет дружбы народов, Москва

¹*Университет города Лима, Перу*

ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ГЛУБОКОЙ РЕЛЬЕФНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

В работе представлено исследование характеристик глубокой дифракционной решетки в применении к оптической фильтрации. Фильтр может быть перестроен путем изменения угла падения входного пучка.

V.A. KOMOTSKIИ, Yu.M. SOKOLOV, N.V. SUETIN,
J.A. PAUYAC¹

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

¹*University of Lima, Peru*

FILTERING PROPERTIES OF DEEP RELIEF PERIODIC REFLECTIVE STRUCTURE

The paper presents a study of the characteristics of a deep diffraction grating in application to optical filtration. The filter can be tuned by changing the angle of incidence of the input beam.

В [1] описано применение периодических прозрачных рельефных структур с прямоугольным профилем в качестве спектральных фильтров. Однако эти фильтры не допускали перестройки частотных характеристик.

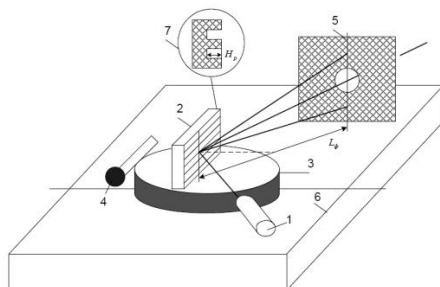


Рис. 1. Схема фильтра с применением ГРС

Схема оптического фильтра, изображенная на рис. 1, включает источник излучения 1, глубокую рельефную структуру (ГРС) 2, поворотную платформу для регулировки угла падения 3, механизм поворота платформы 4, пространственный фильтр 5, основание 6. Форма профиля ГРС показана на вставке 7. Плоскость падения – отражения пучка параллельна линиям ГРС.

Принцип действия. Излучение, падающее на ГРС под углом падения Θ , после отражения от ГРС, распределяется по дифракционным порядкам. Интенсивность в нулевом порядке зависит от глубины ГРС, угла падения и длины волны лазерного излучения. Если глубина решетки превышает четверть длины волны, то при изменении угла падения входного пучка интенсивность излучения нулевого порядка дифракции с данной длиной волны λ изменяется от нулевой до максимальной величины. При соответствующем выборе параметров ГРС, схема может быть применена для подавления определенной длины волны лазерного излучения (режекторный фильтр), а также для выделения определенной длины волны при условии подавления другой длины волны (разделяющий фильтр). Примеры расчета фильтров приведены в [2].

Параметры и характеристики фильтра для выделения спектральной линии с длиной волны $\lambda = 1,31$ мкм ($\lambda = 1,55$ мкм) при условии подавления спектральной линии $\lambda = 1,55$ мкм ($\lambda = 1,31$ мкм) приведены на рис. 2.

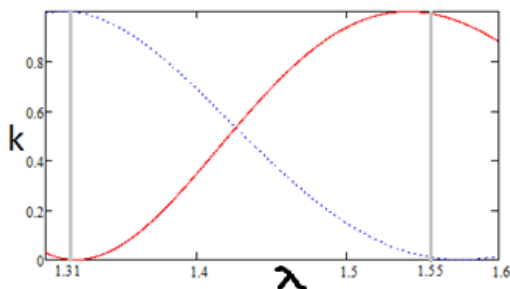


Рис. 2. Расчетные зависимости коэффициентов передачи схемы на рис. 1 от длины волны излучения лазера при глубине ГРС $h = 3$ мкм при углах падения $\Theta = 39.6^\circ$ (сплошная линия) и $\Theta = 40^\circ$ (пунктирная линия)

Список литературы

1. Энциклопедия по машиностроению XXL. URL: <http://mash-xxl.info/>.
2. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Суетин Н.В. // HOLOEXPO 2018. XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. Тезисы докладов. С. 165-170.

Д.Г. ДЕНИСОВ, П.Ц. ЛЮЙ¹

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Лыткаринский завод оптического стекла, Московская обл.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ СУБНАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ ПРОФИЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Исследуются особенности метода дифференциального рассеяния (ARS – angle-resolved scattering), основанного на теории малых возмущений (МВ), в задачах высокоточного контроля локальных отклонений субнанометрового уровня профилей исследуемых оптических и лазерных деталей по данным индикатрисы рассеяния и характера поведения спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ от англ. PSD – Power Spectral Density). Проанализировано влияние шумов электронного тракта, рассеяние Рэлея, аппаратных ограничений приёмного канала прибора и влияния зеркальной компоненты индикатрисы на величину СКО локальных отклонений субнанометрового уровня профилей оптических деталей.

D.G. DENISOV, P.C. LUY¹

*Bauman Moscow State Technical University
¹Lytkarino Optical Glass Factory, Moscow region*

RESEARCH OF METHODOICAL AND TOOL ERRORS RECOVERY OF PARAMETERS SUBNANOMETER LEVEL PROFILES OF OPTICAL PARTS

The features of the method of differential scattering (ARS – angle-resolved scattering), based on the theory of small perturbations (SP), in the tasks of high-precision control of the statistical parameters of the surface profile irregularity investigated optical and laser components – effective root mean square (RMS) of roughness according to the scattering function and the nature of the behavior of the power spectral density (PSD). The effect of electronic path noise, Rayleigh scattering, hardware limitations of the instrument receiving channel and the effect of the mirror component of the indicatrix on the magnitude of the average deviation of the local deviations of the subnanometer level of optical parts profiles are analyzed.

Для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня на сегодняшний день применяются различные

классы оптико-электронных приборов и систем. Наибольший интерес в задачах высокоточного аттестационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как: динамические интерферометры и интерферометры белого света, а также приборы, позволяющие оценивать среднеквадратическое значение поверхностных неоднородностей по данным анализа индикатрисы рассеянного лазерного излучения. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на [1, 2]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS).

Для рассмотренного в работе метода ARS в рамках теории возмущений устанавливается связь между спектральной плотностью мощности высот шероховатости PSD и индикатрисой рассеяния для шероховатой поверхности субнанометрового уровня при влиянии шумов электронного тракта приёмного канала и аппаратных ограничений (инструментальные составляющие структуры общей погрешности), влияние рассеяния Рэлея и влияния зеркальной компоненты индикатрисы рассеяния (методические составляющие структуры общей погрешности).

В результате математического моделирования процесса светорассеяния и восстановления количественных показателей качества профилей образцов оптических деталей на длинах волн лазерного излучения 405, 532 и 633 нм показаны оптимальные варианты оценки минимальной погрешности метода при определённых углах подсвета от 5 и до 10 градусов относительно нормали к области подсвета и углах дифракции рассеянного лазерного излучения в пределах диапазона от -85 до +85 градусов. Показано, что для оптического образца с СКО профиля порядка 1,1 нм [2] погрешности восстановления (измерения) составили величины 0,0058 нм при длине волны рассеянного лазерного излучения 0,405 мкм и 0,044 нм [2] при длине волны рассеянного излучения 0,633 нм.

Список литературы

1. Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Гладышева Я.В., Морозов А.Б., Патрикеев В.Е. Метод аттестационного контроля поверхностных неоднородностей оптических деталей на основе частотного анализа профиля поверхности // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 15-19.
2. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н. Измерение шероховатости прецизионных кварцевых подложек и лазерных зеркал методом дифференциального рассеяния // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 71-75.

Л.А. ДЕГАДНИКОВА, А.В. ОСИНЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлена методика определения упругих постоянных материалов с использованием метода цифровой корреляции изображений. Тестирование методики осуществлялось на образцах из материалов с известными значениями упругих постоянных. Наблюдается хорошая корреляция полученных экспериментальных данных и табличных значений. Получены упругие постоянные на малых образцах из циркониевых сталей.

L.A. DEGADNIKOVA, A.V. OSINTSEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD TO DETERMINE ELASTIC CONSTANTS OF MATERIALS

The method of determination of elastic constants of materials using the method of digital image correlation is presented. The method was tested on the samples of materials with known values of elastic constants. There is a good correlation between the experimental data and table values. Elastic constants on small samples from zirconium steels are obtained.

В настоящее время создаются новые материалы, для дальнейшего использования которых необходимо знать их упругие постоянные. Применяемое испытательное оборудование не позволяет достоверно определять механические характеристики материалов в связи с тем, что не учитываются деформации отдельных узлов машины. Как правило, получаются заниженные значения модуля Юнга. Определение истинных величин деформаций, непосредственно на образце, возможно с помощью внешнего экстензометра. Однако при испытании современных материалов не всегда возможно изготовить образцы нужных размеров [1-3] для установки внешнего экстензометра. Поэтому для определения значений истинных деформаций образца предлагается использовать бесконтактный оптический метод цифровой корреляции изображений [4].

Целью данной работы являлась разработка методики определения упругих постоянных материалов на образцах малых размеров с применением метода цифровой корреляции изображений.

Для тестирования методики использовались гостированные образцы (рис. 1) толщиной 2 мм, шириной 25 мм и длиной рабочей области 65 мм, из стали марки AISI 304.

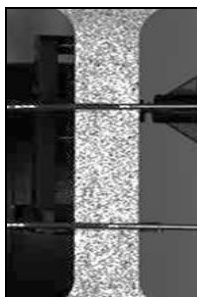


Рис. 1. Образец с установленным внешним экстензометром

На одном из партии образцов было проведено испытание на одноосное растяжение с целью определения максимальной нагрузки соответствующей пределу пропорциональности. Полученный интервал нагрузок, соответствующий упругому нагружению, разбивался на равные участки, после чего на каждом шаге нагружения регистрировались поля продольных и поперечных перемещений с помощью метода цифровой корреляции изображений и вычислялись деформации. Одновременно фиксировались продольные деформации с использованием внешнего экстензометра. Полученные результаты хорошо коррелируют между собой.

Разработанная методика, основанная на применении метода цифровой корреляции изображений, использовалась для определения упругих постоянных на образцах малых размеров из циркониевых сплавов, которые не удовлетворяли требованиям ГОСТа по внешним размерам.

Список литературы

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
2. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Методы испытания на сжатие.
3. ГОСТ 14019-80. (СТ СЭВ 474-88, ИСО 7438-85) Металлы. Методы испытания на изгиб.
4. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: basic concepts, theory and applications. Springer. 2009. P. 321.

Д.Г. ДЕНИСОВ, Ю.О. ПРОСОВСКИЙ, О.Ф. ПРОСОВСКИЙ¹

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», Калужская обл.

АНАЛИЗ ПОРЕШНОСТЕЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО ОПТИЧЕСКОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ НАПЫЛЯЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Представлена современная система прямого широкополосного оптического контроля. Рассмотрены особенности данной системы. Выделены основные преимущества и недостатки по отношению к существующим аналогам. Проанализированы спектральные зависимости пропускания интерференционных светофильтров, полученных при использовании различных систем оптического контроля.

D.G. DENISOV, Yu.O. PROSOVSKIY, O.F. PROSOVSKIY¹

Bauman Moscow State Technical University

¹Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region

ANALYSIS OF APPEARANCE PERSPECTIVE SYSTEM DIRECT OPTICAL BROADBAND CONTROL OF THREADED THICKNESSES OPTICAL COATINGS

A modern direct broadband optical control system is presented. The features of this system are considered. The main advantages and disadvantages in relation to existing analogues are highlighted. The spectral dependences of the transmission of interference light filters obtained using various optical control systems are analyzed.

На сегодняшний день, распространенным напылительным оборудованием является ряд установок отечественного и импортного производства: ВУ-1А, ВУ-2М, Balzerz ВАК-760, Laybold А710 и др. Важно отметить, что одним из ответственных элементов напылительного оборудования является его система контроля толщины наносимых пленок, определяющая, в основном, технологические возможности напылительного оборудования при нанесении многослойных интерференционных структур. В напылительном оборудовании применяются методы прямого и косвенного контроля, где точность измерения толщины наносимых пленок оптических покрытий не всегда удовлетворяют требованиям заказчика, в силу несовершенства этих

систем. В данной работе приведен анализ современного вакуумного оборудования и его систем контроля толщины нанесения тонких оптических пленок [1, 2], с целью практической оценки точности совпадения измерений спектральной зависимости пропускания реально изготовленного светофильтра с математически рассчитанной моделью изготавливаемого покрытия. С этой целью, в работе проанализированы схмотехнические решения построения систем прямого и косвенного контроля, а также предложена принципиально новая конструкция, обеспечивающая высокие эксплуатационные характеристики создаваемых оптических светофильтров.

В работе представлены графики спектральных зависимостей светофильтров, полученных в ходе трех разных технологических процессов с использованием разработанной на «ОНПП Технология» системы прямого оптического контроля толщины наносимых покрытий. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что в ходе нанесения слоев оптической конструкции, благодаря использованию прямого оптического контроля в серии из трех процессов соблюдалась высокая точность воспроизводства отдельных слоев от процесса к процессу. Реанализ полученных результатов с помощью программы OptiRe показал наличие отклонений реально нанесенных слоев от расчетных, менее 0,5 %, что соответствует разбросу не более 3 нм в спектральной области длин волн от 605-620 нм.

В результате проведенных научных исследований, получены следующие предварительные результаты: 1) определена и разработана наиболее точная и перспективная система оптического контроля – система прямого широкополосного оптического контроля; 2) продемонстрирована работоспособность разработанной системы в производственных условиях с воспроизводимостью толщин слоев интерференционных покрытий – в пределах 0,6 %.

Список литературы

1. Справочник по вакуумной электронике /под ред. Д. Хоффман, Б. Сингха М.: Техносфера, 2011.
2. Лоулесс К. Физика тонких пленок /под ред. Дж. Хасса, М.: Мир, 1970. Т. 4.

В.Л. МИНАЕВ, К.Н. МИНЬКОВ, Г.Н. ВИШНЯКОВ, Г.Г. ЛЕВИН
Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТОМОГРАФ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛОВОЛОКОН

Рассмотрены особенности построения и работы интерференционного оптического томографа на базе интерферометра Маха-Цендера. Показана возможность применения данного томографа для измерения пространственного распределения показателя преломления стекловолокон с помощью томографического метода.

V.L. MINAEV, K.N. MINKOV, G.N. VISHNYAKOV, G.G. LEVIN
All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

INTERFERENCE OPTICAL TOMOGRAPH FOR MEASURING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE OPTICAL FIBER

The features of construction and operation of an interference optical tomograph based on a Mach-Zehnder interferometer are considered. This tomograph can be used to measure the spatial distribution of the refractive index of optical fibers.

Неразрушающий контроль пространственного распределения показателя преломления является актуальной задачей, возникающей при производстве оптических микрорезонаторов различных видов световолокон. Особенно важно проведение этих измерений для световолокон, имеющих неоднородную внутреннюю структуру (волокна с сохранение поляризации, градиентные волокна и т.п.) [1]. В настоящее время бурно развивается направление аддитивных технологий, которые позволяют производить изделия из прозрачных материалов таких как кварц, акрил, силикон и др. [2]. Имеются уже готовые 3D-принтеры для такой 3D-печати [3]. Для контроля внутренних дефектов в таких изделиях также необходимо проводить измерение пространственного распределения показателя преломления.

Традиционно для решения этой задачи использует такие методы как: поляризационная и многолучевая интерферометрия, дифференциальная интерференционная микроскопия, количественная фазовая микроскопия. Однако, такие методы позволяют получать ограниченную информацию.

Они применимы для цилиндрических и осесимметричных волокон и не подходят для изделий аддитивных технологий, имеющих сложную форму. Поэтому целесообразным является использование методов оптической томографии. Ранее был разработан томографический микроскоп, позволяющий исследовать твердые прозрачные изделия, такие как световолокна, оптические диэлектрические микрорезонаторы [4-5]. Его основные недостатки в том, что размер изделий ограничен до 1 мм, а сами они должны находиться на зеркальной поверхности. Это приводит к тому, что излучение дважды проходит через объект, увеличивается оптическая длина пути, что накладывает более жесткие ограничения на используемую иммерсионную жидкость.

В настоящей работе рассмотрен оптический интерференционный томограф, на базе интерферометра Маха-Цендера с лазерным источником, позволяющий исследовать объекты на просвет. Использование фазосдвигающего устройства в составе томографа: зеркала на пьезоприводе, позволяет получать фазовые проекции и проводить реконструкцию с использованием методов компьютерной томографии. Использование объектива (вместо микрообъектива) позволяет исследовать объекты размером более 1 мм.

Объект исследования (световолокно) располагается в специальной кювете с иммерсионной жидкостью и закреплен с помощью переходной втулки на валу шагового двигателя. Для минимизации биений волокно поджимается к канавке в виде конуса. Иммерсионная жидкость подбирается таким образом, чтобы разница показателей преломления между ней и объектом была не более 0,02 [5]. В этом случае можно пренебречь рефракцией и использовать методы радоновской томографии [6]. В работе представлены эксперименты по томографии различных световолокон с использованием разработанного томографа.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения соглашения №14.625.21.0041 от 26.09.2017г. (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62517X0041).

Список литературы

1. EIA/TIA-455-37A FOTP-37 Low or High Temperature Bend Test for Fiber Optic Cable.
2. Luo J., et. al. // Proceeding of SPIE. 2016. V. 9738. P. 97380Y.
3. Klein J, et. al. // 3D printing and additive manufacturing. 2015. V. 2. № 3. P. 92-105.
4. Миньков К.Н., Минаев В.Л., Левин Г.Г. Труды школы-семинара «Волны-2018». С.46-47.
5. Левин Г.Г., Минаев В.Л., Миньков К.Н., Ермаков М.М. Сборник трудов 15-ой межд. научно-технической конференции «Голография. Наука и практика». 2018. С.27-28.
6. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989.

Л.А. ЗЫКОВА, Л.И. БУРМАК

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

**СПЕКТРАЛЬНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МОДУЛЬ
НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОБЪЕКТОВ**

Предложена схема интерференционного модуля на основе акустооптической фильтрации, устанавливаемого на выходе устройства получения широкополосных изображений исследуемого объекта для реализации спектральных и фазовых измерений. В частности, модуль может быть помещен на выходе микроскопа проходящего света для измерений методом цифровой голографии.

L.A. ZYKOVA, L.I. BURMAK

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS, Moscow

**SPECTRAL INTERFEROMETRIC MODULE BASED
ON ACOUSTO-OPTIC FILTRATION FOR MEASURING
THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE OPTICAL
CHARACTERISTICS OF OBJECTS**

The scheme of the interferometric module based on acousto-optic filtration is proposed. It is placed at the output of the device for obtaining broadband images of inspected object and implements spectral and phase measurements. In particular, the module can be placed at the output of transmitted light microscope to implement measurements by digital holography techniques.

В настоящее время активно развивается направление по созданию компактных интерференционных модулей, устанавливаемых на выходе устройств получения широкополосных изображений исследуемого объекта (микроскопа, эндоскопа и т.д.) и позволяющих измерять пространственное распределение фазовой задержки, вносимой объектом в прошедшую через него или отразившуюся от него световую волну [1, 2]. В работе предложена схема интерференционного модуля на основе акустооптической (АО) фильтрации, с помощью которого можно проводить не только фазовые, но и спектральные измерения, и таким образом повысить информативность и достоверность исследований. Модуль может быть использован с обычным микроскопом проходящего

света (рис. 1) для регистрации цифровых голограмм. Он представляет собой интерферометр Майкельсона с искусственным опорным источником [1] и АО фильтром изображений в выходном канале. Входящий в интерферометр световой пучок, переносящий изображение объекта, фокусируется входным объективом 1 и делится светоделителем 2 на два канала. В одном из каналов пучок отражается от зеркального угольника 3, смещаясь в поперечном направлении для записи внеосевых голограмм, сохраняя при этом в себе изображение объекта. В другом канале в плоскости фокусировки пучка расположен точечный отражатель 4, который позволяет "стереть" изображение и сформировать опорный световой пучок. Вернувшиеся из каналов пучки объединяются светоделителем 2, коллимируются выходным объективом 5, софокусным входному объективу 1, спектрально фильтруются АО-фильтром 6 и образуют на камере 7 интерференционное изображение исследуемого объекта. Для восстановления фазового профиля объекта зарегистрированное изображение обрабатывается методами цифровой голографии. Регистрация нескольких голографических изображений при спектральной перестройке АО фильтра позволяет повысить точность фазовых измерений, а также получать дополнительную информацию за счет спектрального контрастирования [2]. Результаты экспериментов демонстрируют эффективность описанной схемы в решении задач восстановления фазового профиля объектов на разных длинах волн.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-38-00869, РФФИ 18-38-20057.

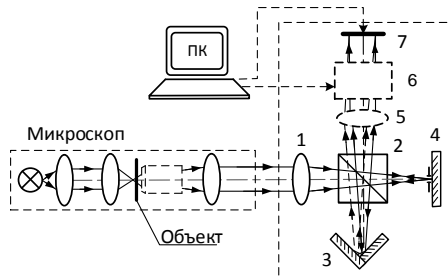


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Girshovitz P., Shaked N.T. // Opt.Expr. 2013. V. 21(5). P. 5701-5714.
2. Shan M., Kandel M.E., Majeed H., Nastasa V., Popescu G. // Opt.Expr. 2016. V. 24(25). P. 29033-29039.
3. Мачихин А.С., Польщикова О.В., Рамазанова А.Г., Пожар В.Э. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41(19). С. 16-21.

В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ, А.А. СКРЫННИК

Московский государственный технологический университет «Станкин»

**ЛАЗЕРНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ
СИСТЕМА, РАБОТАЮЩАЯ В СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ОБЪЕКТА**

Предложена бесконтактная лазерная измерительная система (ЛИИС) для измерения геометрических параметров изделий машиностроения работающая в импульсном режиме среднего ИК-диапазона $\lambda = 2,0-2,7$ мкм.

V.I. TELESHEVSKI, A.A. SKRYNNIK

Moscow State Technological University «Stankin»

**LASER PULSE INTERFERENCE SYSTEM, WORKING
IN THE MIDDLE IR RANGE FOR MEASURING
THE GEOMETRICAL PARAMETERS OF OBJECT**

A contactless laser measuring system (LIIS) for measuring the geometrical parameters of engineering products operating in the pulsed mode of the mid-IR range $\lambda = 2.0-2.7$ μm .

В современном мире спрос на использования высокотехнологичного станочного оборудования машиностроительных, инструментальных, научно-производственных фирмах и ВПК, с улучшением качества выпускаемой на них продукции обусловлен ростом требований к точности обработки поверхностей деталей.

Прецизионная гомодинная и гетеродинная интерферометрия широко используется в машиностроении, обеспечивая высокую точность и разрешающую способность при измерении как отклонений размеров, формы, взаимного расположения и качества поверхностей отдельных деталей, так и геометрической объёмной точности их соединений в узлы и сложные машины, и приборы с программным управлением [1].

При этом достигается большую чувствительность, высокую высокое разрешение (до 0,5 нм), точность до 0,1-0,5 мкм/м, быстродействие, и охватывается диапазон до 80 м и более.

Однако эти высокие метрологические характеристики достижимы в видимом диапазоне лазерного излучения ($\lambda = 0,4-0,63$ мкм) и при наличии зеркально отражающих поверхностей $Ra = 0,01-0,1$ мкм.

Реальные объекты машиностроения имеют диффузно отражающие поверхности, что затрудняет непосредственный оптический контакт с изделием. Кроме того, возникают задачи измерения субмикронных смещений диффузно рассеивающих поверхностей в условиях высокочастотных колебаний, которые решаются с помощью спекл-интерферометрии обладающей значительным пространственным и временным усреднением [2].

При исследовании шероховатых поверхностей порядка $Ra = 1,2-2,5$ мкм в видимом спектре ($\lambda = 0,4-0,63$ мкм), возникают проблемы, обусловленных появлением спекл структуры, которая снижает контраст интерференционного сигнала, что влияет как на точность, так и на погрешность измерений.

В связи с этим представляется целесообразным построение импульсной ЛИИС, работающей в среднем ИК-диапазоне ($\lambda = 2,0-2,7$ мкм). Это позволяет обеспечить высокую точность бесконтактного контроля детали в режиме реального времени с возможностью непосредственно регистрировать «зеркальное» отражение от шероховатых поверхностей $Ra = 1,2-2,5$ мкм, что соответствует получению деталей методами чистового точения и получистового шлифования (порядка 7-9 квалитета точности).

Список литературы

1. Yang S., Zhang G. A Review of Interferometry for Geometric Measurement // Measurement and Technology. 2018.
2. Shao L., Gorman J.J. Pulsed laser interferometry with sub-picometer resolution using quadrature detection // 2016. V.24(15). P. 17459-17469.

В.А. ПАРШИН, О.А. ЕВТИХИЕВА, В.В. БЛИЗНЮК
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ
ИЗЛУЧЕНИЯ В СВОБОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО
ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ**

Приведены результаты измерений и моделирования углового распределения степени линейной поляризации на некоторых участках диаграммы направленности излучения в свободное пространство одномодовых лазерных диодов, а также рассмотрено влияние деградации гетероструктуры на данное распределение.

V.A. PARSHIN, O.A. EVTIKHIEVA, V.V. BLIZNYUK
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

**MODELING OF SPATIAL-ENERGY AND POLARIZATION
STRUCTURE OF RADIATION IN THE FREE SPACE
OF SINGLE-MODE LASER DIODES**

We present the results of measurements and modeling of linear polarization degree angular distribution on some radiation pattern areas of single-mode laser diode radiation into free space, and observe the impact of heterostructure degradation on the distribution.

Полупроводниковые одномодовые лазерные диоды (ЛД) имеют множество применений в самых разных областях науки, техники и медицины. В связи с этим часто возникает вопрос о диагностике качества и контроля состояния их гетероструктуры. Существует несколько способов анализа темпа деградации ЛД, например рассмотренные в работах [1-3]. Однако в настоящее время слишком мало внимания уделяется диагностике поляризации излучения одномодовых ЛД в свободное пространство вдоль всей диаграммы направленности (ДН), хотя поляризационные параметры очень чувствительны к изменениям внутри гетероструктуры. Ещё меньшее внимание уделено соответствующему теоретическому описанию поляризационной структуры излучения ЛД в свободное пространство.

Моделирование углового распределения степени линейной поляризации – или, в соответствии с [4], контраста – по всей ДН излучения одномодовых ЛД требует учёта векторного характера

электромагнитного поля как в области светового пятна на выходном зеркале ЛД, так и в дальней зоне. В связи с этим возникает вопрос о физически и математически корректном описании дифракции каждой в отдельности линейно поляризованной компоненты излучения на выходном зеркале – ТЕ и ТМ моды. Решение данной проблемы можно осуществить с использованием дипольно-волновой теории дифракции, наиболее простое описание которой изложено в [5]. Таким образом, задавая параметры светового пятна на выходном зеркале ЛД, можно рассчитать структуру светового поля в дальней зоне с учётом поляризации и далее сопоставить результат с экспериментальными данными (рис. 1). Соответствие теоретических и экспериментальных результатов расчётов и измерений пространственно-энергетических и поляризационных параметров поля в дальней зоне позволяет косвенным образом определить распределение поля ТЕ и ТМ моды на выходном зеркале, а динамика изменения данного распределения с увеличением времени наработки ЛД позволит судить о деградационных изменениях внутри гетероструктуры.

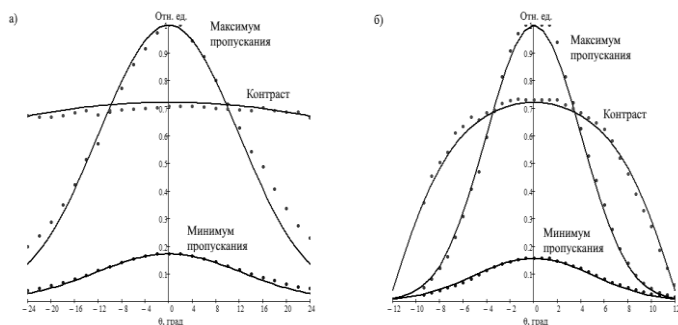


Рис. 1. Результаты измерений и моделирования ДН и углового распределения контраста при сканировании пучка вдоль волнового фронта в вертикальной плоскости (а), горизонтальной плоскости (б)

Список литературы

1. Wen P.Y., et. al. Identification of degradation mechanisms of blue InGaN/GaN laser diodes // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. V. 48. № 41. P. 1500506-1500506.
2. Wen P.Y., et. al. Catastrophic Degradation of InGaN/GaN Blue Laser Diodes // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2016. V. 16. Iss. 4. P. 1-4.
3. Monti D., et. al. Long-term degradation of InGaN-based laser diodes: Role of defects // Microelectronics Reliability. 2017. V. 76-77. P.584-587.
4. ГОСТ Р ИСО 12005-2013. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений параметров лазерных пучков. Поляризация. Введ. 2013–09–06. М.: Стандартиформ, 2014.
5. Низьев В.Г. Дипольно волновая теория дифракции электромагнитного излучения // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 5. С. 601-607.

В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, П.В. МУЛИН, Й.Н. ВИН

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

В работе исследовано изменение чувствительности оптоэлектронного преобразователя угловой скорости, обеспечивающего измерение угловой скорости в диапазоне ± 360 %/с. Проведена компенсация изменения чувствительности преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) при действии линейного ускорения.

V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, P.V. MULIN, YIN NAING WIN

Moscow Aviation Institute (National Research University)

COMPENSATION OF LINEAR ACCELERATION EFFECT ON THE ANGULAR VELOCITY TRANSDUCER BASED ON THE OPTICAL TUNNELING EFFECT

In this paper presents the sensitivity changing of the optoelectronic angular velocity transducer, which provides measurement of the angular velocity in the range of ± 360 %/s. The compensation of the sensitivity changing of the angular velocity transducer based on the optical tunneling effect (OTE) by the action of linear acceleration.

Оптоэлектронный кольцевой преобразователь угловой скорости 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). При воздействии линейного ускорения происходит смещение КР. Это смещение КР вдоль осей OX' и OY' оказывает большое изменение чувствительности преобразователя угловой скорости.

При влиянии линейного ускорения на преобразователь все точки кольцевого резонатора смещаются в одном направлении, что приводит к несимметричному изменению зазоров d_i (Ω_z , a_x) и изменению чувствительности мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ к действию угловой скорости (рис. 1).

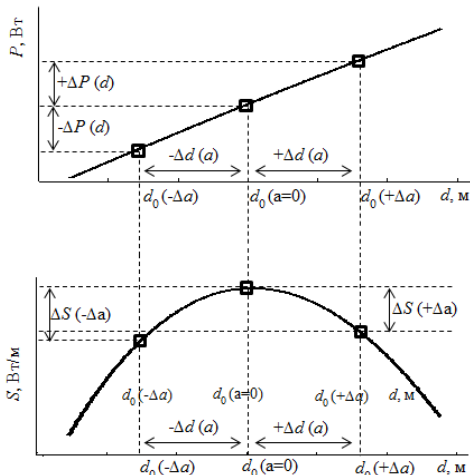


Рис. 1. Изменение чувствительности и мощности оптического излучения к изменению начальных зазоров при воздействии линейного ускорения

При воздействии линейного ускорения вдоль оси OX' величины начальных зазоров увеличиваются для узла съема информации МОТЭ1 и уменьшаются для узла съема информации МОТЭ3, а при воздействии линейного ускорения вдоль оси OY' величины начальных зазоров уменьшаются для узла съема информации МОТЭ2 и увеличиваются для узла съема информации МОТЭ4 при следующих параметрах: диаметр КР – 5 мм, толщина КР – 300 мкм, ширина КР – 100 мкм, толщина опоры $h_{\text{опор}} = 100$ мкм, ширина опоры $t_{\text{опор}} = 100$ мкм, начальный зазор $d_0 = 300$ нм, длина волны света $\lambda = 1600$ нм, угол падения $\theta = 42^\circ$. При воздействии линейного ускорения ($a = 5g$) смещение кольцевого резонатора составляет около 50 нм.

Компенсация ускорения может быть произведена методом коррекции коэффициента усиления. При использовании метода коррекции коэффициента усиления погрешность изменения чувствительности составляет 0,7 % при воздействии линейного ускорения ($a = 5g$).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Бусурин В.И., Коробков В.В., Ёин Наинг Вин Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Мехатроника Автоматизация Управление. 2016. Т. 17. № 5. С. 340–346.
2. Khalil H.K. Nonlinear systems, 3rd Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.

М.В. САПРОНОВ, Н.М. СКОРНЯКОВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНДИКАТРИС РАССЕЯНИЯ СВЕТА В РАМКАХ ТЕОРИИ МИ

Разработан алгоритм расчета безразмерных комплексных амплитудных функций рассеяния. Создана программа моделирования 3D-индикатрис рассеяния света на однородных и изотропных сферических частицах. Представлена динамика 3D-моделей при изменении параметров рассеивающих частиц.

M. V. SAPRONOV, N.M. SKORNYAKOVA

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF LIGHT SCATTERING INDIKATRISES WITHIN THE FRAMEWORK OF MIE THEORY

The algorithm for calculating of dimensionless complex amplitude scattering functions has been developed. A program for modeling 3D indicatrixes of light scattering on homogeneous and isotropic spherical particles has been created. The dynamics of 3D-models when changing the parameters of scattering particles is presented.

Современный уровень развития технологий в сфере производства источников и приемников лазерного излучения позволяет создавать оптико-электронные комплексы, способные обнаружить рассеянное рэлеевское излучение. Практическая осуществимость регистрации излучения такой малой мощности представляет весьма перспективные возможности создания новых оптических методов диагностики потоков на основе явления упругого рассеяния света на атомах и молекулах вещества, которые уже успешно реализуются, например, в методе рэлеевской термометрии [1-3].

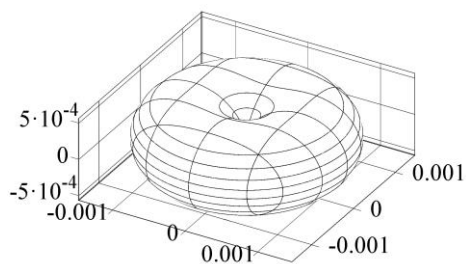
Теоретической основой большинства оптических методов, принцип работы которых построен на упругом рассеянии света, таких как, например лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображению частиц, являются аналитические выражения для расчета безразмерных комплексных амплитудных функций рассеяния, полученные голландским физиком Г. Ми в 1908 г. Они справедливы для расчета рассеяния на сферических однородных и изотропных прозрачных или

слабо поглощающих частицах [4]. Причем диапазон их применимости включает в себя и размеры частиц, характерные для рассеяния Рэлея.

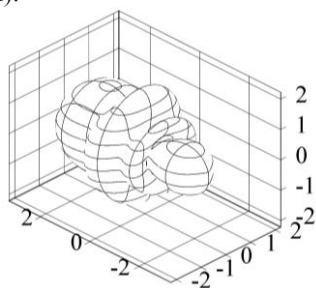
На основе рекуррентных формул расчета коэффициентов Г. Ми, полученных Д. Дейрменджаном, был разработан алгоритм расчета углового относительного распределения интенсивности рассеянного излучения – индикатрисы рассеяния. Также была создана программа, которая позволяет строить 3D-модели индикатрис рассеяния и отслеживать их изменение в динамике при изменении параметров рассеивающего центра или падающего излучения [5].

Результаты моделирования 3D-индикатрис рассеяния света на одной частице были применены к расчету пространственного распределения интенсивности рассеянного рэлеевского излучения на системе монодисперсных частиц. Индикатрисы рассеяния когерентного линейно поляризованного света с длиной волны $\lambda = 355$ нм на частицах с показателем преломления $m = 1,1$ и радиусами $r = 0,3$ нм и $r = 120$ нм для примера показаны на рис. 1 и 2 соответственно. Представленные алгоритм и его компьютерная реализация могут быть применены при разработке экспериментальных комплексов оптической диагностики на основе рассеяния Рэлея и при решении обратной задачи, то есть получения параметров среды на основе экспериментальных результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 3.8009.2017/БЧ).



($\lambda = 355$, $m = 1,1$, $r = 0,3$ нм)
Рис. 1. Индикатриса рассеяния
в приближении Рэлея



($\lambda = 355$, $m = 1,1$, $r = 120$ нм)
Рис. 2. Индикатриса рассеяния
в приближении больших частиц

Список литературы

1. Kempema N.J., Long M.B. // Applied Optics. 2014. V. 53 (29). P. 6688-6697.
2. Fischer. A. // Applied Sciences. 2017. V. 7. P. 1298.
3. Hartl S., Geyer D., et. al. // Combustion and Flame. 2018. V. 189. P. 126-141.
4. Mie G. // Annalen der Physik. 1908. V. 25. P. 377-445.
5. Sapronov M.V., Skornyakova N.M. // Scientific Visualization. 2017. V. 9 (3). P. 42-53.

В.И. БУСУРИН, П.С. КУДРЯВЦЕВ, Ч. ЛЮ

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ИЗМЕРЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ПРОФИЛОМЕТРА

Проведено исследование структуры системы прогноза высоты. Исследовано влияние скорости сканирования на стабильность бесконтактного сканирующего профилометра, создан блок скорости управления в системе профилометра и определены максимальные скорости движения пробы профилометра вдоль поверхности.

V.I. BUSURIN, P.S. KUDRYAVTSEV, ZHE LIU

Moscow Aviation Institute (National Research University)

INVESTIGATION OF THE SCANNING RATE EFFECT ON THE QUALITY OF A NON-CONTACT PROFILOMETER

This paper presents the structure of the profiler height prediction system. The effect of scanning speed on the operation of the non-contact scanning profilometer and profilometer speed control unit are investigated. The maximum speed of the surface profilometer sample was provided.

В настоящее время, бесконтактные профилометры широко используются в технологических процессах изготовления прецизионных авиационных деталей сложной формы, где нужно обеспечить высокие точности. Для обеспечения точного бесконтактного сканирования, используется способы фотонный сканирующий туннельный микроскоп (ФСТМ) на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). В рассматриваемом профилометре используется оптическим преобразователем приближения (ОПП) на основе оптического туннельного эффекта при сканировании поверхности тела. В процессе работы такой бесконтактный профилометр производит измерение перемещения линейного пьезодвигателя, который компенсирует изменения зазора d между ОПП и поверхностью тела, возникающие при сканировании, до заданной начальной величины d_0 . Это обеспечивает получение данных о форме поверхности тела в процессе сканирования по точкам измерения. В процессе движения профилометра вдоль осей OX и

А.Ю. БЫКОВСКИЙ

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

МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНОГО ПРЕДСКАЗАТЕЛЯ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

На примере сетевых задач позиционно-зависимой криптографии известно, что теоретическая модель, сочетающая случайный предсказатель и схему генерации запутанных фотонных пар, позволяет защититься от коллективных атак злоумышленников с ограниченными ресурсами. Однако для практической реализации таких схем необходимо учитывать возможность проведения целого ряда классических и квантовых атак, ранее исследованных для схем квантового распределения ключа. Ряд сложностей при этом можно преодолеть с помощью многопараметрических функций многозначной логики.

A. Yu. BYKOVSKY

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

RANDOM ORACLE MODEL IN OPTOELECTRONIC CRYPTOGRAPHY SCHEMES

It is known for network tasks of position-based cryptography, that theoretical model, combining random oracle with schemes of entangled photons generation, can protect from collective adversaries with limited resources. However, for the hardware realization of such schemes one should take into account the possibility of a set of classical and quantum attacks, investigated earlier for quantum key distribution lines. Some of problems here can be solved with the help of multiparametric multiple-valued logic functions.

В задачах позиционно-зависимой криптографии и верификации фактического местоположения абонента сети при измерении временных задержек сигнала [1] использование схем квантовой криптографии дает ограниченный результат: не удастся добиться безусловной (unconditional) криптостойкости, но можно обеспечить криптостойкость к коллективным атакам в рамках модели случайного предсказателя [2]. Поскольку эта идеальная модель случайной хэширующей функции востребована в целом ряде криптографических схем, в том числе в пост-квантовой криптографии, то представляется актуальной задача практической реализации схем на базе случайного предсказателя.

Теоретически обоснованная в [2] схема верификации местоположения абонента P показана на рис. 1. Даже если нечестный абонент P использует дополнительные узлы P_1^* и P_2^* для передачи ложных сигналов, а также имеет доступ к тому же случайному предсказателю, что и верифицирующие узлы V_1 и V_2 , то все равно специальный протокол обмена случайными числами (с генерацией запутанных фотонных пар) позволит избежать несанкционированного доступа.

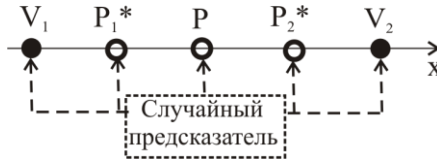


Рис. 1. Одномерный случай схемы верификации местоположения абонента [2], использующей верификаторы V_1, V_2 и доступ всех узлов сети к случайному предсказателю

Практическая реализация указанной выше схемы сталкивается с рядом сложностей. При этом сама схема случайного предсказателя аналогична схеме вычисления многозначно-логической функции со случайно выбранными параметрами [3], ранее разработанной для реализации аналога криптографического метода одноразового шифроблокнота. Поэтому здесь требуется подобрать качественный квантовый генератор случайных чисел и протестировать его криптотестами NIST (и рядом других), а также разработать устройство на базе ПЛИС. Более сложным, однако, представляется анализ устойчивости оптоэлектронной схемы случайного предсказателя к многочисленным видам атак, исследованным в рамках разработок схем квантового распределения ключа [3]. В том числе особо опасны схемы атак, использующие ослепляющие импульсы на фотоприемники верификаторов, а также уязвимости, обусловленные разбросом временных характеристик пар фотоприемников и соответствующих каскадов обработки.

Отдельной проблемой является сопряжение классического вычислителя с квантовыми входными выходными каналами случайного предсказателя.

Список литературы

1. Broadbent A., Schaffner C. // Designs, Codes and Cryptography. 2016. V. 78 (1). P. 351.
2. Unruh D. // In: EUROCRYPT. 2014. P. 1. doi:10.1007/978-3-662-44381-1_1.
3. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48 (9). С. 777.

А.В. ПАВЛОВ, А.М. РОЗАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА КОГНИТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Показано, что высокочастотная фильтрация в кольцевой схеме голографии Фурье ведет к динамике отклика, феноменологически аналогичного истерии и, с ростом частоты, шизофрении. Даны результаты численного моделирования.

A.V. PAVLOV, A.M. ROZANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

COGNITIVE DISORDERS MODELING BY FOURIER-HOLOGRAPHY TECHNIQUE

It is demonstrated, high-pass filtering in Fourier holography circular setup leads to the output dynamics, that is like to Hysteria manifestation, and then to Schizophrenia.

В рамках когнитивного подхода к обработке информации актуально моделирование когнитивных функций, основная из них – формирование внутренней картины мира (ВКМ) и её корректировка включением новой информации. Если новая информация противоречит сложившейся ВКМ, то возникает когнитивный диссонанс (КД) [1], редуцирование которого в норме завершается формированием новой ВКМ, адекватной внешней реальности. Результаты нейрофизиологических исследований показывают, что нарушение баланса общего и деталей во ВКМ ведет к когнитивным нарушениям, наиболее яркие их проявления – истерия и шизофрения [2, 3]. Восприятие новой информации, противоречащей ВКМ, формализовано логикой с исключением; реализация такой логики, возникновение КД и его редуцирование ранее [4] промоделировано методом голографии Фурье (рис. 1). Баланс между общими и частными признаками ВКМ и воспринимаемой информацией меняется в силу фильтрации на голограммах, обусловленной характеристиками регистрирующих средств. Высокочастотная фильтрация (ВФ) соответствует повышению внимания к деталям в ущерб общности, а низкочастотная – повышению внимания к общему с потерей деталей.

Моделировалась ВФ на голограмме ВКМ. Показано, что ВФ ведет к динамике отклика, феноменологически аналогичной истерии [2] и, при

дальнейшем росте частоты, шизофрении [3]. На рис. 2 даны, зависимости периодичности истерик – срывов устойчивости отклика от относительной ширины полосы ВФ. Рост ВФ сопровождается нарушением связности ВКМ, характерной для шизофрении [3]. На рис. 3 даны сечения автокорреляционной функции ВКМ при разных значениях параметра ВФ.

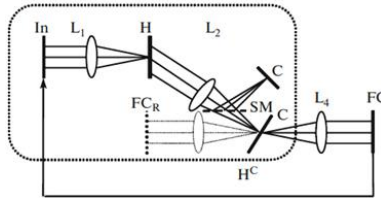


Рис. 1. 6f-схема голографии Фурье резонансной архитектуры, моделирующая логику с исключением: L_1, L_2, L_3, L_4 - фурье-преобразующие линзы, H и H^C - голограммы: наличествующей ВКМ и новой информации, соответственно, In и C - плоскости входная и корреляций, SM - полупрозрачное зеркало, FC_R - изображение при записи H^C , замыкание резонатора видеотрактом $FC \rightarrow$ In

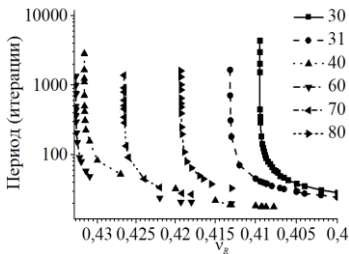


Рис. 2. Зависимость периода всплесков от относительной ширины полосы фильтра v_R для ряда значений параметра v_0 , $V_{606} = 8$

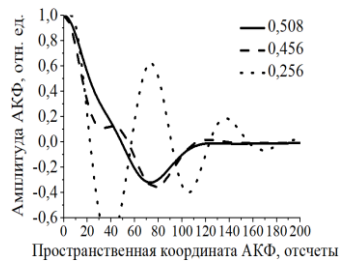


Рис. 3. Сечения АКФ паттерна ВКМ при $v_0 = 80$ для приведенных значений v_R

Таким образом, имеем аналогии с данными нейрофизиологии не только на феноменологическом, но и на функциональном уровнях, а именно: роли высокочастотной фильтрации как причины когнитивных нарушений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-01-00676-а.

Список литературы

1. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Ювента, 1999.
2. Шапиро Д. Невротические стили. М.: Ин-т Общегуманитарных исследований, 2000.
3. Edwards M.J., et.al. // Brain. 2012. P. 1-18.
4. Павлов А.В. // Научн.-техн. вестн. инф. техн., мех. и оптики. 2014. Т. 89. № 1. С. 17-25.

А.А. БОЛОТОВА, А.Н. ПУТИЛИН¹

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

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

УГОЛ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ С ПИКОПРОЕКТОРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Приведены результаты исследования угла поля зрения в световодных системах дополненной реальности с источником изображения – пикопроектором. Изучены параметры клиновидного изогнутого световода.

A.A. BOLOTOVA, A.N. PUTILIN¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

FIELD OF VIEW IN AUGMENTED REALITY DISPLAYS BASED ON LIGHTGUIDES WITH PICOPROJECTION IMAGE SOURCE

Presents the result of researching of field of view in lightguide augmented reality systems with image source – picoprojector. Parameters of the curved wedge lightguide system was studied.

Основными требованиями, предъявляемыми к очковым устройствам дополненной реальности, являются: широкий угол поля зрения, большой выходной зрачок системы, высокое качество изображения, легкий вес, компактность. Обычно, в качестве источников изображения в виртуальных дисплеях используются компактные LCD, LCoS, OLED модули, однако их осветительные системы обладают крупными габаритами. В последнее время быстрыми темпами развиваются компактные пикопроекторные системы, обладающие высоким качеством изображения, малым энергопотреблением при достаточной яркости, что увеличивает потенциал их применения в носимых устройствах дополненной реальности.

Целью данной работы является исследование угла поля зрения в дисплеях дополненной реальности, основанных на световодах с источником изображения – пикопроектором.

В системе с планарным волноводом угол поля зрения ограничивается критическим углом полного внутреннего отражения с одной стороны и отношением толщины к продольному размеру подложки – с другой

стороны. Максимально возможный угол поля зрения в системе определяется формулой:

$$FoV = \tan^{-1} \frac{d}{t} - \sin^{-1} \frac{1}{n},$$

где d – длина световода, t – толщина световода, n – показатель преломления световода.

Если световод представляет собой систему из концентрических цилиндрических поверхностей с радиусами кривизны R и $R + t$, где t – толщина световода [1], то угол поля зрения системы определяется выражением:

$$FoV = \pi/2 - \sin^{-1} \left(\frac{R}{n \cdot (R + t)} \right).$$

Систему, состоящую из поверхностей с не концентричными радиусами кривизны [3] можно назвать клиновидным изогнутым волноводом. Угол поля зрения в данной системе (рис. 1) определяет соотношение радиусов кривизны поверхностей, а также осевая толщина световода:

$$FoV_{eye} = 2 \cdot \tan^{-1} \cdot \left(\frac{R_1}{t} \sin \left(\frac{FoV}{2} \right) \right),$$

где R_1 – радиус кривизны внешней поверхности световода, t – осевая толщина, $FoV = \xi_{max} - \xi_{min}$ – угол поля зрения относительно центра кривизны внешней поверхности световода, ξ_{min} и ξ_{max} определяются путем трассировки лучей по методу Дериньяка [2] $\xi_{max} = U_n - I_n$, $\xi_{min} = U_3 - I_3$, n – номер луча, вышедшего из волновода при максимально угле ввода $\pi/2$.

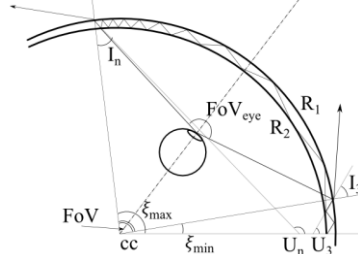


Рис. 1. Угол поля зрения в изогнутом клиновидном волноводe превышает 100 ° при диапазоне ввoдных углов 45 °

Список литературы

1. DeHoog E., Holmstedt J., Aye T. Field of view of limitations in see-through HMD using geometric waveguides // Appl. Opt. 2016. V. 55. P. 5924-5930.
2. Dereniak E.L., Dereniak T.D. Geometrical and Trigonometric Optics. Cambridge University, 2008.
3. Travis A.R.L., Chu J., Georgiou A. Curved wedges and shearing gratings for augmented reality // Proc. SPIE. 2018. V. 10676. P. 106760D.

Д.Е. ПИСКУНОВ¹, П.А. НОСОВ¹,
В.И. БАТШЕВ^{1,2}, А.А. ЯБЛОКОВА¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ВАРИОСИСТЕМ С ЖИДКИМИ ЛИНЗАМИ

Представлены результаты расчёта классических и лазерных оптических систем с переменными характеристиками на основе линз с изменяемой оптической силой. С помощью разработанных методик рассчитаны фотографический вариообъектив и лазерная вариосистема для формирования гауссова пучка.

D.E. PISKUNOV¹, P.A. NOSOV¹,
V.I. BATSHEV^{1,2}, A.A. YABLOKOVA¹

¹Bauman Moscow State Technical University

²Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

ANALYSIS OF VARIOSYSTEMS BASED ON TUNABLE-FOCUS LENSES

The results of calculating of classical and laser optical systems with variable characteristics based on tunable-focus lenses are presented. A photographic zoom lens and a laser variosystem for the transformation of the Gaussian beam are calculated using developed methods.

При решении практических задач в различных областях науки и техники широкое распространение получили оптические системы с переменными характеристиками [1], наиболее распространённым способом реализации таких систем является перемещение её компонентов друг относительно друга по заданному закону, который определяется назначением вариосистемы и необходимостью обеспечения заданных оптических характеристик. В таких вариосистемах используются высокоточный электромеханический привод, что приводит к повышенным требованиям к конструкции вариосистемы. Механическое перемещение компонентов также отрицательно сказываются на быстродействии системы. Особо остро эти недостатки проявляются для оптических вариосистем в составе малогабаритных устройств: камер мобильных телефонов, карманных проекторов, наשלемых систем индикации и др.

Альтернативным схемотехническим решением является использование при разработке вариосистем линз с изменяемой оптической силой.

Поскольку оптическая сила линзы определяется главным образом показателем преломления материала и радиусами кривизны поверхностей, для её изменения необходимо изменить форму или показатель преломления. Для этих целей используют жидкие оптические среды, поэтому в большинстве случаев под линзами с изменяемой оптической силой подразумевают именно жидкие линзы.

На сегодняшний день известно несколько технологий реализации жидких линз [2, 3], две из них – на основе эффекта электросмачивания, в результате которого изменяется кривизна поверхности контакта двух несмешиваемых жидкостей и на основе изменения кривизны эластичной мембраны, ограничивающей объём жидкости – доведены до коммерческой реализации компаниями Varioptic и Optotune.

Расчёт вариосистем с жидкими линзами включает такие же этапы, как и для оптических систем с механическим перемещением линз [1]. Основная особенность расчёта оптической вариосистемы на основе жидких линз проявляется на этапе структурно-габаритного синтеза. Причём разработка оптических систем для формирования гауссовых пучков должна проводиться на базе теории лазерной оптики [1, 4, 5].

Габаритный расчёт вариообъектива с жидкими линзами сводится к решению системы нелинейных уравнений [1]: $P(a_i, b_i) = P(m)$, где P – вектор параксиальных величин (например, фокусное расстояние, увеличение или длина системы), которые должны быть равны заданным значениям; m – аргумент базисной функции, определяющий положение компонентов или оптическую силу; a_i, b_i – коэффициенты разложения, $i = 1, 2, \dots, N$, где N – количество членов разложения. В работе представлены результаты расчёта оптических вариосистем с жидкими линзами – фотографический вариообъектив и лазерная вариосистема для формирования гауссова пучка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20155.

Список литературы

1. Рожков О.В., Пискунов Д.Е., Носов П.А. и др. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 1. С. 72-83.
2. Chiu C.-P., Chiang T.-J., Chen J.-K., et. al. // Journal of Adhesion Science and Technology. 2012. № 26. P. 1773-1788.
3. Hazra K., Dasgupta S.S., Chakraborty S. // International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016. P. 3264-3268.
4. Аниканов А.Г., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. // Опт. журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 30-36.
5. Носов П.А., Павлов В.Ю., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. // Опт. журнал. 2011. Т. 78. № 9. С. 34-44.

М.С. РУСАКОВА, В.Г. ВОЛОСТНИКОВ¹, С.П. КОТОВА¹,
С.А. КИШКИН¹

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

¹*Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*

АНАЛИЗ КАРДИОГРАММ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА

Предлагается метод классификации кардиограмм, основанный на математическом подходе теории спиральных пучков света (СПС). В рамках подхода введена метрика, согласно которой проведена классификация групп кардиограмм по типу «норма» и по типу «инфаркт». Продемонстрирована принципиальная возможность применения метода к анализу контуров кардиограмм.

M.S. RUSAKOVA, V.G. VOLOSTNIKOV¹, S.P. KOTOVA¹,
S.A. KISHKIN¹

Samara National Research University

¹*Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS*

CARDIOGRAM ANALYSIS BY SPIRAL BEAMS MATHEMATICS

Cardiogram classification method based on spiral beams (SB) mathematics is suggested. Contour proximity metric is introduced within the boundaries of the approach. Normal and infarction cardiograms are classified using considered method. A general possibility for SB mathematics application to cardiogram contour analysis is demonstrated.

В настоящее время большое внимание уделяется автоматизированным методам анализа физиологических сигналов, в том числе и в кардиологии. Для анализа кардиограмм традиционно применяют аппарат нейросетей [1], однако есть и другие подходы, основанные на применении математических преобразований [2]. В настоящей работе, в развитие идей, выдвинутых в [3, 4] предлагается метод распознавания контуров, основанный на математическом формализме спиральных пучков света.

В кардиографии контуры нормальной и патологической (например, инфарктной) кардиограмм имеют характерный вид. Спиральные пучки

отличия будут наблюдаться и для распределения интенсивностей построенных для контуров кардиограмм спиральных пучков (рис. 1).

Можно ввести метрику близости контуров, основанную на корреляционной функции для интенсивностей:

$$\mu(I_1, I_2) = 1 - \max_{\theta \in [0, 2\pi]} |\Pi(I_1, I_2, \theta)|, \text{ где}$$

$$\Pi(\theta) = \frac{\iint_{\mathbb{R}^2} I^{(1)}(z, z^*) I^{(2)}(ze^{i\theta}, z^* e^{-i\theta}) dx dy}{\sqrt{\iint_{\mathbb{R}^2} I^{(1)}(z, z^*) I^{(1)}(ze^{i\theta}, z^* e^{-i\theta}) dx dy} \cdot \sqrt{\iint_{\mathbb{R}^2} I^{(2)}(z, z^*) I^{(2)}(ze^{i\theta}, z^* e^{-i\theta}) dx dy}},$$

$I(z, z^*) = S(z, z^*) \cdot S^*(z, z^*)$, где амплитуда СПС для контура кардиограммы $\zeta(t)$, замкнутого на периоде сердцебиения, есть:

$$S(z, z^*) = \exp\left(\frac{-zz^*}{\rho^2}\right) \int_0^T \exp\left\{-\frac{\zeta(t)\zeta^*(t)}{\rho^2} + \frac{2z\zeta^*(t)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \int_0^t [\zeta^*(\tau)d\zeta - \zeta(t)d\zeta^*]\right\} \left| \frac{d\zeta}{dt} \right| dt$$

На основании данной метрики была проведена классификация реальных кардиограмм из базы данных: 9 кардиограмм по типу «норма» и 11 по типу «инфаркт» на эталонном наборе из 20 кардиограмм. Предложенный метод продемонстрировал чувствительность 82 %, специфичность – 75 %.



Рис. 1. Распределение интенсивности СП для вывода кардиографа V_1 в случае нормальной (слева) и инфарктной(справа) кардиограмм

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-42-630934).

Список литературы

1. Исаков Р.В., Аль-Мабрук М.А., Сушкова Л.Т. // Медицинская техника. 2011. № 3 (267). С. 18-26.
2. Романец И.А., Атопков В.А., Гурия Г.Т. // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. № 4. С.895-915.
3. Волостников В.Г., Котова С.П., Кишкин С.А. // Квантовая электроника. 2013. № 43. С. 646.
4. Волостников В.Г., Котова С.П., Кишкин С.А. // Квантовая электроника. 2018. № 48. С. 268.

Е.А. БАБАНИН, А.В. БЛАНК, Н.А. СУХАРЕВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕМ ВОЛНОВОГО ПУЧКА НА ВЫХОДЕ ДЕЦЕНТРОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предложены аппроксимирующие зависимости для пространственных характеристик распределения интенсивности волнового пучка в плоскости регистрации. Сформулированы алгоритмы управления поворотом профиля без изменения его структуры, допустимые деформации растяжения и сжатия вдоль выбранных направлений. Обсуждается трехкомпонентная мультипликативная форма для ABCD матрицы оптической системы-конвертора профиля волнового пучка.

Е.А. BABANIN, A.V. BLANK, N.A. SUHAREVA
Lomonosov Moscow State University

CONTROL PROFILE OF THE WAVE BEAM AT THE OUTPUT OF A DECENTED OPTICAL SYSTEM

The approximating dependencies for the spatial characteristics of the intensity distribution of the wave beam in the registration plane are proposed. Was formulated algorithms for control the rotation of a profile without changing its structure, allowable tensile and compression deformities along selected directions. A three-component multiplicative form for the ABCD matrix of the optical system-converter of the wave beam profile is discussed.

Современные системы беспроводного оптического энергоснабжения, как правило, разрабатываются для осесимметричного пучка гауссова или супергауссова профиля. Простота формирования осесимметричного распределения при высоких значениях плотности потока энергии осложняется неравномерностью распределения температуры поверхности фотопреобразующей матрицы, неоднородностью распределения электрического потенциала и токовых нагрузок. Один из способов создания профилированных коллимированных оптических пучков, в частности прямоугольного профиля, обсуждается в представленной работе. Рабочая оптическая схема децентрирована и не обладает осевой симметрией. Даже в центрованном состоянии существует лишь плоскость симметрии Р, образованная осью рефлектора и осью первичной линзовой группы. При сильных абберациях профиль преобразуется либо в открытый тороид, либо в закрытый, но в любом варианте его можно

описать функцией 4-го порядка, а регистрируемый профиль пучка рассматривать как отображение Радона этого тороида или его томограмму в рабочей проекции [2, 3]. Описание пространственного распределения интенсивности выполнено с помощью компонент тензора центральных пространственных моментов [4], определяющих угла наклона большей оси, астигматизм, и ряд других характеристик:

$$D_{1,2} = 2\sqrt{2} \sqrt{M_{xx}^{(2)} + M_{yy}^{(2)} \pm \text{sign}(M_{xx}^{(2)} M_{yy}^{(2)}) \sqrt{(M_{xx}^{(2)} - M_{yy}^{(2)})^2 + 4(M_{xy}^{(2)})^2}},$$

$$2\theta = \arctan \left(\frac{2M_{xy}^{(2)}}{M_{xx}^{(2)} - M_{yy}^{(2)}} \right),$$

$$\text{Ast} = \text{sign} \left(M_{xx}^{(2)} - M_{yy}^{(2)} \right) \frac{\sqrt{(M_{xx}^{(2)} - M_{yy}^{(2)})^2 + 4(M_{xy}^{(2)})^2}}{M_{xx}^{(2)} + M_{yy}^{(2)}},$$

$$S_{\text{BeamEllips}} = \pi \frac{D_1 D_2}{4} = 4\pi \sqrt{M_{xx}^{(2)} M_{yy}^{(2)} - (M_{xy}^{(2)})^2}.$$

Обсуждается динамический диапазон перестройки профилей пучка при тороидальных фронтальных и осевых проекциях, создание исходных открытых и закрытых тороидов, переходящими в пределе в гауссову форму вблизи перетяжки волнового пучка. На рис. 1 представлены экспериментальные карты перестройки распределения интенсивности. Одно из следствий построенных карт – именуемая система профилирования и наведения пучка и конкретный излучатель на длине 1083 нм позволяют создать монотонное распределение интенсивности диаметром не более 150 мм.

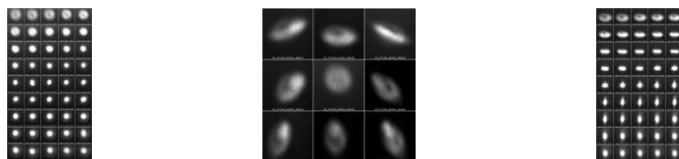


Рис. 1. Перестройка профиля пучка для центрованной (слева) и нецентрованной (справа) систем и перестройка угла поворота (в центре)

Список литературы

1. Babanin E.A., Blank A.V., et. al. Chaos and order of the wave beams positional parameters at the output of long atmospheric path // AOO18. Paper No.10833-344.
2. Deans S.R. The Radon transform and some of its applications. Courier Corporation, 2007.

А.В. БЕЛАШОВ^{1,2}, И.А. ШЕВКУНОВ¹, С.С. НАЛЕГАЕВ¹,
С.Э. ПУТИЛИН¹, Й.-Ч. ЛИН³, Ч.-Ж. ЧЖЭН³, Н.В. ПЕТРОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³Тайваньский государственный педагогический университет, Тайбэй

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОЛЛИНЕАРНОЙ ВЫРОЖДЕННОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В СРЕДЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ НЕЛИНЕЙНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Представлены результаты разработки численной модели, описывающей взаимодействие двух фемтосекундных импульсов в среде с локальными неоднородностями нелинейного показателя преломления. Приведены результаты анализа дифракционных картин зондирующего импульса в ближней зоне, обусловленные сформированным в ходе взаимодействия фазовым набегом. Также в работе были оценены условия эксперимента, при которых результат дифракции волны на данных локальных неоднородностях может быть различим на осевой фоновой голограмме.

A.V. BELASHOV^{1,2}, I.A. SHEVKUNOV¹, S.S. NALEGAEV¹,
S.E. PUTILIN¹, Y.-C. LIN³, C.-J. CHENG³, N.V. PETROV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

³National Taiwan Normal University, Taipei

NUMERICAL SIMULATION OF NONCOLLINEAR DEGENERATE PHASE MODULATION IN THE MEDIA WITH INHOMOGENEOUS NONLINEAR REFRACTIVE INDEX

The works present our results on development of numerical model describing interaction between two femtosecond pulses in the media with local variations of nonlinear refractive index. The analysis of probe wave diffraction patterns, formed as a result of nonlinear interaction with pump beam is performed. Moreover we have estimated experimental conditions for monitoring of diffraction rings, corresponding to small inhomogeneities of nonlinear refractive index in the studied object.

Нелинейные оптические явления в последние годы привлекают все большее внимание как в связи с необходимостью разработки новых методов исследования и диагностики различных объектов, так и благодаря

развитию новых источников высокоинтенсивного лазерного излучения [1]. Фемтосекундные лазеры предоставляют отличные возможности как для генерации большой плотности мощности, необходимой для мониторинга нелинейных оптических эффектов в нерезонансных средах, так и для исследования временных характеристик таких процессов [2].

Данная работа посвящена численному моделированию формирования неколлинеарной вырожденной фазовой модуляции (НВФМ) в оптически-нелинейной среде с локальными неоднородностями нелинейного показателя преломления. Постановка задачи и схема рассматриваемого эксперимента повторяет работу [3], однако образец теперь содержит небольшие участки, характеризующиеся вариацией нелинейно-оптических свойств. В результате численного моделирования наводимой в таком образце НВФМ, было установлено, что при определённом отличии оптических нелинейных параметров локальных неоднородностей от характеристик содержащей их среды, картина дифракции зондирующей волны в ближней зоне будет содержать дополнительные структуры. При этом изменение времени задержки между двумя импульсами приводит к смещению области их взаимодействия внутри образца, что также оказывает влияние на вид дифракционного отклика (рис. 1). В общем случае, вид формирующейся в результате НВФМ дифракционной картины зондирующего импульса зависит от конфигурации экспериментальной схемы [3] и параметров образца. В частности, в данной работе исследовалось влияние нелинейного показателя преломления, времени затухания наведённого градиента показателя преломления, размеров оптически-нелинейных неоднородностей, а также глубины их расположения в оптическом образце.

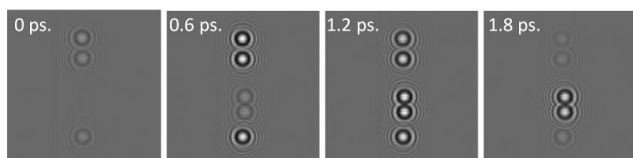


Рис. 1. Примеры смоделированных дифракционных откликов зондирующего волнового фронта, при разной задержке между двумя импульсами

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МНТ в рамках научного проекта № 19-52-52018 МНТ_а.

Список литературы

1. Kravtsov V., et. al. // Nature nanotechnology. 2016. V. 11 (5). P. 459.
2. Hassan M.T., et. al. // Nature. 2016. V. 530 (7588). P. 66.
3. Petrov N.V., et. al. // Optics Letters. 2018. V. 43 (15). P. 3481.

Н.А. ТАЛАЙКОВА^{1,2}, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОЙ ВОЛНЫ В МЕТОДЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Выполнено математическое моделирование формирования квазиплоской волны в дальней области дифракции после прохождения световой волны через фазовый объект и пространственно частотной фильтрации в дифракционной фазовой микроскопии. Экспериментально исследованы вариации результирующего сигнала для пространственных фильтров круглой формы разных размеров в диапазоне от 0.2 мм⁻¹ до 15.9 мм⁻¹.

N.A. TALAIKOVA^{1,2}, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

²*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

OPTIMAL PARAMETERS MODELING FOR REFERENCE WAVE FORMING IN DIFFRACTION PHASE MICROSCOPY

We present the results of modeling of plane wave forming in far area of diffraction after wave passed through the phase object and spatial filtration in diffraction phase microscopy. We show the experimental results of signal variations for different cases with spatial filter size variation in Fourier plane at optical 4-f system.

Метод дифракционной фазовой микроскопии отличается от других методов количественной фазовой микроскопии высокой стабильностью оптической системы к различного рода внешним возмущениям вследствие конструктивных особенностей системы (рис. 1). Представленные ранее исследования показывают широту применения данного метода в различных областях в апробации к объектам как технического, так и биологического происхождения [1, 2]. Как было показано ранее, параметры, которые вносят вклад в пространственную когерентность, оказывают существенное влияние на результирующий сигнал в данном методе, хотя для временной когерентности аналогичная зависимость не была выявлена нашей научной группой [3], и, в некоторой степени, зависимость сигнала от параметров системы была определена из

конструкции системы (например, параметров матрицы детектора), группой Г. Попеску [2].

Целью работы является математическое моделирование результирующего сигнала для различных параметров оптической системы и исследование изменения когерентных свойств оптических полей в связи с пространственной фильтрацией световой волны для формирования опорной волны в данной системе. Для расчетов оптимальных параметров комбинации: период дифракционной решетки / размер окна пространственного фильтра – в данной системе использовались следующие значения: источник освещения – частично когерентный круглой формы, увеличение микроскопической системы и параметры детектора изображения постоянные для всех расчетов при определении зависимости функции когерентности от двух вышеуказанных параметров.

Для диапазона размеров пространственного фильтра от 0.2 до 15.9 мм⁻¹ смоделированы результирующие сигналы, которые хорошо коррелируют с полученными нами ранее экспериментальными результатами [4], показывают степень взаимной когерентности волн при частичной пространственной фильтрации полей в фурье-плоскости, и в приближениях могут быть рассмотрены в рамках классической теории [5].

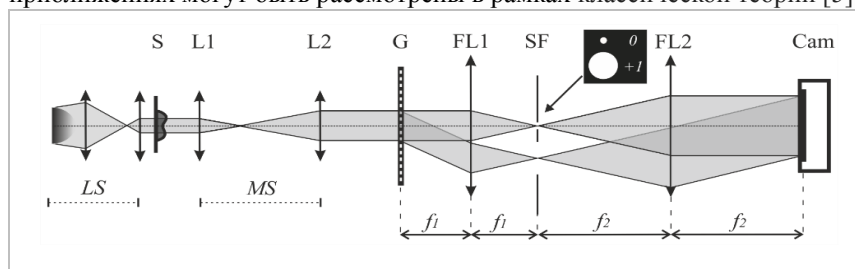


Рис. 1. Оптическая схема дифракционного фазового микроскопа:
 LS - система частично когерентного освещения, S - объект,
 L1,L2, FL1,FL2 - линзы, MS – система микроскопа, G - дифракционная
 решетка, SF - пространственный фильтр, Cam - детектор изображения

Список литературы

1. Edwards C., Zhou R., et al. // App. Opt. 2014. V. 53. P. G33.
2. Bhaduri B., Edwards C.A., Pham H., Zhou R., et al.// Adv. Opt. Phot. 2014. V. 6. P. 57.
3. Талайкова Н.А., Рябухо В.П. // VI межд. конф. Фотоника и информационная оптика: сборник трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 227.
4. Kalyanov A.L., Talaikova N.A., Ryabukho V.P. // Processings of SPIE. V. 9448. P. 944817.
5. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. Roberts&Company Publishers, 2005.

Е.А. БАБАНИН, К.М. БЕККИЕВ, А.В. БЛАНК, А.А. НАСОНОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОДНОМОДОВОГО И МНОГОМОДОВОГО ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-временной модуляции функции распределения интенсивности волнового пучка на выходе протяженной трассы длиной более 1000 м. Мгновенная структура профиля и стек кадров распределений интенсивности анализируются на основе совокупности свойств массива локальных тензоров структуры изображений.

Е.А. BABANIN, К.М. BEKKIEV, А.V. BLANK, А.А. NASONOV
Lomonosov Moscow State University

DIFFERENTIAL GEOMETRY OF THE PROFILE OF THE INTENSITY DISTRIBUTION OF SINGLE-MODE AND MULTI-MODE WAVE BEAMS

The results of experimental research of the spatiotemporal modulation of the intensity distribution function of the wave beam at the output of an extended path longer than 1000 m are presented. Was analyzed the instantaneous structure of the profile and the stack of intensity distributions frames based on the combination of array properties of local tensors of the images structure.

Сложная динамическая структура распределения комплексной амплитуды оптического пучка на выходе протяженной атмосферной трассы может быть рассмотрена в терминах, типичных для описания профиля поверхности, применяемых в физике твердого тела или геофизике. Характеристические величины при подобных подходах основаны на анализе геометрии кривых постоянного уровня, направления наискорейшего спуска из данной точки поверхности, квадратичных комбинациях, описывающих деформацию анализируемой поверхности.

Пространственное распределение интенсивности коллимированных пучков регистрируется в плоскости перетяжки, смещенной оптической системой в плоскость регистрации камеры технического зрения. Длины волн непрерывного зондирующего излучения находятся в окне прозрачности атмосферной трассы и составляют 808 нм для многомодового и 1064 нм для одномодового пучков. Регистрируемые с

частотой опроса не менее 1 кГц, временем экспозиции не более 10 мкс распределения интенсивности формируют стек длительности не менее 1 с [1]. Для каждой позиции стека с координатой $(c, r$ – номера столбцов и строк цифрового изображения, k – номер кадра) определяется локальный тензор структуры [2]:

$$\hat{f}(c, r, k) = \begin{bmatrix} J_{xx}(c, r, k) & J_{yx}(c, r, k) & J_{tx}(c, r, k) \\ J_{xy}(c, r, k) & J_{yy}(c, r, k) & J_{ty}(c, r, k) \\ J_{xt}(c, r, k) & J_{yt}(c, r, k) & J_{tt}(c, r, k) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где усреднение выполнено по пространственно-временному окну:

$$J_{xx}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C \omega(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta} \right)^2, \quad (2)$$

$$J_{yy}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C \omega(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi} \right)^2, \quad (3)$$

$$J_{xy}(c, r, k) = J_{yx}(c, r, k) = \sum_{\eta}^R \sum_{\xi}^C \omega(c - \xi, r - \eta) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \xi} \right) \left(\frac{\partial I(\xi, \eta, t)}{\partial \eta} \right). \quad (4)$$

На основе тензора локальной структуры создается набор метрик компонент стека – спектр локальных ориентаций, вектор Гренлунда и оператор структуры, локальные согласованность и энергоёмкость структуры, доминирующая ориентация и её динамические свойства [3]. Пример спектров локальных ориентации деформированного профиля Лагерр-Гауссового пучка представлен на рис. 1.

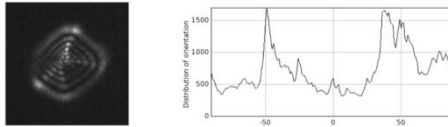


Рис. 1. Наблюдаемые состояния волнового пучка

Помимо тензора структуры изображений, созданного из квадратичных форм первых пространственных производных, предложены матричные характеристики профиля пучка из комбинаций вторых пространственных производных. Особенность подобных характеристик заключена в их связи с векторными свойствами волнового пучка, в частности – со значением вихревой компоненты поля. Практическая значимость развиваемого аппарата существенна для метеооптических приложений, оптической локации, оптических коммуникаций.

Список литературы

1. Blank A.V., Kapranov V.V., et. al. Atmospheric turbulence effects on the performance of the laser wireless power transfer system // Proc. SPIE. V. 10096.
2. Bernd J. Spatio-Temporal Image Processing: Theory and Scientific Applications.
3. Arsenyan T.I., Pisklin M.V., Suhareva N.A., Zotov A.M. Dynamical anisotropy of the optical propagation paths. // Proc. SPIE. V. 9680. P. 96801Z.

А.Н. БОРОДИН

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

УМЕНЬШЕНИЕ РАССЕЯННОГО СВЕТА СОЛНЕЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ С СИДЕРОСТАТОМ

Конструкция солнечного телескопа с сидеростатом и режим его работы предполагает наличие большого количества рассеянного света, отраженного элементами оправы сидеростата и купола под острым углом к оптической оси объектива. Решение этой проблемы позволяет улучшить контрастность изображений солнечного диска и продвинуться в вопросах разработки изображающих систем для объектов с малым контрастом и ярким мешающим источником в поле зрения.

A.N. BORODIN

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

SCATTERED LIGHT DECREASING OF SOLAR TELESCOPES WITH SIDEROSTAT

The solar telescope design with siderostat and its operation mode implies the presence of a large diffused light amount reflected by the siderostat cell and dome elements at an acute angle to the objective lens optical axis. The solution to this problem can improve the contrast of the solar disk images and advance in the development of imaging systems for objects with low contrast and a bright interfering source in the field of view.

Большие солнечные телескопы имеют определенные особенности. Для улучшения качества изображения инженеры двигаются в сторону увеличения светового диаметра объектива телескопа. Телескоп при этом является устройством, «запыхивающим» стационарный спектрограф. Сам телескоп является объектом достаточно большим геометрически. Объект наблюдения – Солнце движется по небу близко к экваториальной зоне и вертикальные смещения имеют небольшие значения в пределах $\pm 23,5^\circ$. Это позволяет обеспечить слежение за объектом наблюдения с помощью сидеростата. Для оптимизации технических затрат размеры сидеростата (плоского зеркала) делают как можно более маленькими, не более 183 % от размера объектива (если хотят полностью заполнить объектив телескопа в момент летнего солнцестояния).

Так как размер сидеростата минимальный, то телескоп практически «смотрит» на оправу зеркала, освещенную Солнцем. Рассеянно излучение Солнца под острым углом к оптической оси попадает в телескоп и заметно ухудшает качество изображения (рис. 1, вверху). Избавиться от этого излучения, покрасив оправу сидеростата малоотражающей краской, не представляется возможным (возникает нагрев деталей оправы, который создает восходящие потоки воздуха, искажающие волновой фронт приходящего излучения и ухудшающие качество изображения).

Одним из способов решения данной проблемы может быть отражение ненужного света обратно из помещения путем размещения вокруг оправы сидеростата уголкового отражателя (рис. 1, снизу). Так как зеркало осуществляет слежение за Солнцем и удерживает его всегда в плоскости, перпендикулярной поверхности зеркала и проходящей через полярную ось и центр Солнца, то можно использовать уголкового отражатель, упрощенного вида. Уголкового отражатель представляет собой набор параллельных элементов, каждый из которых представляет собой две плоскости под прямым углом (рис. 2).

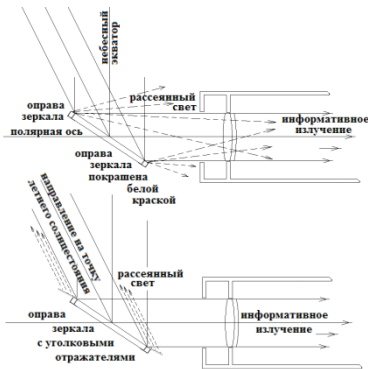


Рис. 1. Схема уменьшения паразитной засветки объектива солнечного телескопа

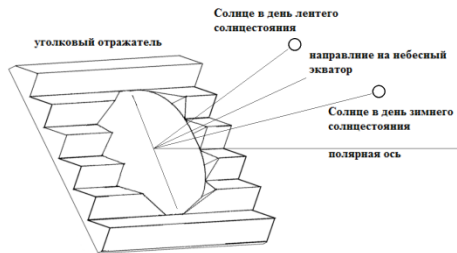


Рис. 2. Оправка зеркала с упрощенным уголкового отражателем

Большая часть излучения отражается назад, часть отражается в плоскости небесного экватора. Укрепление уголкового отражателей на оправе сидеростата зеркала позволяет отразить паразитный свет наружу, не подсвечивая объектив и другие элементы купола телескопа и в тот период времени, когда Солнце находится ниже небесного экватора.

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН, В.А. ЖИГАЛОВ

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

МАТРИЧНОЕ ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО МОНОБЛОЧНОГО ГИРОСКОПА

В статье рассматривается методика анализа базовой оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ с ПЛД) разработанная средствами векторно-матричного аппарата, позволяющая рассчитать оптимальную по критерию максимальной добротности оптической схемы конструкцию гироскопа для навигационных систем с заданными показателями качества.

N.A. US, A.A. AVERSHIN, V.A. ZHIGALOV

Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin» Voronezh

MATRIX DESCRIPTION OF THE OPTICAL SCHEME OF THE RING MONOBLOCK GYROSCOPE

In article the technique of the analysis of the basic optical scheme of a ring monoblock gyroscope with the semiconductor laser diode (KMG with PLD) developed by means of the vector-matrix device, allowing to calculate a gyroscope design, optimum by criterion of the maximum good quality of the optical scheme, for navigation systems with the set quality indicators is considered.

Основным элементом лазерных гироскопов являются кольцевые резонаторы (КР), в которых лазерный луч образует стоячую волну, что позволяет реализовать эффект Саньяка. Для расчета параметров формируемого лазерного излучения в КР удобно использовать векторно-матричный аппарат. Его основу составляет – закон ABCD матриц [1]. Для применения закона ABCD пространственные характеристики лазерного излучения описывают гауссовыми волнами, которые оказываются собственными для оптических резонаторов, образованных гауссовыми элементами.

Оптическую схему, состоящую из множества последовательно расположенных оптических элементов, можно описать одной эквивалентной матрицей M в виде произведения матриц отдельных элементов M_1, M_2, \dots, M_n записанных справа налево в том порядке, в котором оптический гауссов пучок проходит эти элементы.

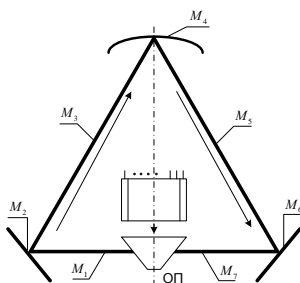


Рис. 1. Базовая оптическая схема кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом: ОП – опорная плоскость, M_1, M_3, M_5, M_7 – матрица перемещения в оптическом канале, M_2, M_4, M_6 – матрица отражения от зеркальных поверхностей

На рис. 1 представлена треугольная оптическая схема КМГ с внутренним расположением ПЛД относительно контура. Математическая модель исследуемой треугольной оптической схемы описывается следующим выражением:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2 * n_c}{r} & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где L – длина оптического пути, n_v – коэффициент преломления в воздухе, n_c – коэффициент преломления в среде, r – радиус кривизны зеркала [2].

Полученная математическая модель позволяет рассчитать оптимальные по критерию максимальной добротности оптической схемы варианты базовой конструкции КМГ с ПЛД и рекомендовать их при реализации инерциальных навигационных систем подвижных объектов в качестве чувствительных элементов для измерения угловых скоростей.

Список литературы

1. Кудашов В.Н., Плаченев А.Б., Радин А.М. Комплексные ABCD-преобразования для кольцевых оптических резонаторов с потерями и усилением // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1. С. 87-92.
2. Авершин А.А., Ус Н.А. Расчет добротности оптического контура кольцевого лазерного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660692. 28.08.2018.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФАЗОВЫЙ ПВМС КАК УСТРОЙСТВО ВВОДА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНВАРИАНТНЫЙ ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯТОР

В работе приведены результаты моделирования работы инвариантного оптического коррелятора, использующего фазовый пространственно-временной модулятор света в качестве устройства ввода изображений. Приведены результаты моделирования корреляционного распознавания различных наборов изображений. Предложена методика синтеза корреляционных фильтров для улучшения качества корреляционного распознавания.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

PHASE SLM AS AN IMAGE INPUT DEVICE IN THE INVARIANT OPTICAL-DIGITAL CORRELATOR

The results of modeling of the working of the invariant optical correlator with the phase SLM as an image input device are presented. The results of the modeling of the correlation recognition of different image sets are presented. An optimization method is proposed to improve the quality of correlation recognition.

В инвариантных оптических корреляторах могут использоваться различные пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) для ввода распознаваемых изображений и голографических корреляционных фильтров в оптическую систему. Для того чтобы реализовать оптический коррелятор с наилучшими характеристиками распознавания изображений, необходимо выбрать ПВМС с наиболее подходящими характеристиками, а также синтезировать голографические корреляционные фильтры с учётом особенностей выбранных ПВМС.

Фазовый ПВМС выполняет модуляцию лазерного излучения в зависимости от поданного на него сигнала. Современные фазовые ПВМС имеют глубину модуляции 8 бит (256 оттенков серого) и могут обеспечивать максимальный фазовый сдвиг от 2π до 8π . Также отражательные фазовые ПВМС обладают хорошей дифракционной эффективностью, что является большим плюсом при использовании в дифракционных оптических системах.

Для моделирования корреляционного распознавания использовались полутоновые изображения танков T-72, Abrams, Chieftain и Leopard при разных углах поворота. Всего было использовано 16 наборов изображений, отличающихся размером и фоном. Распознавание было проведено с использованием синтезированных корреляционных фильтров ОТ МАСН (optimal tradeoff maximum average correlation height) и MINACE (minimum noise and correlation energy) [1, 2].

Чтобы выполнить моделирование вывода изображений на фазовый ПВМС нужно поставить в соответствие каждому значению яркости изображения свое значение фазы. В данной работе значения фазы изменялись в пределах от 0 до 2π . Таким образом, распознаваемые изображения превращались в комплексные, каждый элемент матрицы такого изображения определяется формулой (1):

$$I_{ph}(x, y) = \exp\left(\frac{I_{amp}(x, y)}{255} 2\pi i\right). \quad (1)$$

Для одного из наборов изображений были получены следующие результаты: вероятность ошибки распознавания, рассчитанная по критерию Неймана-Пирсона, увеличилась от 0,06 % (распознаваемые изображения не модифицировались) до 1,97 % (распознаваемые изображения были модифицированы по формуле (1)).

Если синтезировать корреляционный фильтр из тренировочного набора изображений, модифицированных аналогичным образом, то для этого же набора вероятность ошибки снизится до 0,001 %.

Было проведено моделирование корреляционного распознавания изображений с различной глубиной модуляции фазы. Для всех наборов было показано, что с использованием предложенной методики синтеза корреляционных фильтров вероятность ошибки распознавания значительно уменьшается по сравнению с результатами распознавания изображений, которые не были модифицированы согласно формуле (1).

Оценено влияние фазовых шумов на результаты корреляционного распознавания. Установлено, что фазовые шумы с максимальными и минимальными набегам фазы $\pm 0,4\pi$ не оказывают значительного влияния на результаты корреляционного распознавания изображений.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.
2. Evtikhiev N., Shaulskiy D., Zlokazov E., Starikov R. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V. 8398.

Ч.Б. КАЙТУКОВ, А.В. ЯНОВСКИЙ

Научно-технический центр «Атлас», Москва

**МЕТОД ОПТОЭЛЕКТРОННОГО АНАЛИЗА
ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА ФУРЬЕ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ЗАЩИТНЫХ
ГОЛОГРАММ**

Рассмотрена возможность использования аналогового преобразования Фурье для аппаратного контроля подлинности защитных голограмм.

Ch.B. KAYTUKOV, A.V. YANOVSKY

Scientific and Technical Centre «Atlas». Moscow

**THE METHOD OF OPTOELECTRONIC ANALYSIS
OF SPATIAL FOURIER SPECTRUM FOR AUTHENTICATION
OF SECURITY HOLOGRAMS**

Opportunity of use Fourier analog transformation consider for the automatic control of authenticity of security holograms.

Приборный контроль защитных голограмм широко применяется для ускорения и упрощения процедуры проверки их подлинности. Существующие методики контроля используют основные свойства и признаки исследуемых голограмм для их анализа и сравнения с эталонными образцами. Однако имеющиеся приборы, анализирующие спектральные характеристики голограмм, базирующиеся на выявлении подобия углов дифракции отражённого света от идентичных областей изображения голограмм и определяющие тем самым подобие их периодических структур, в настоящее время, являются в большей степени средствами экспертного, но не оперативного контроля. Причина этого недостаточная достоверность получаемых результатов и низкий уровень автоматизации при проведении контрольных замеров и, как следствие, не достаточное быстродействие используемых приборов.

Возможным путём преодоления указанных недостатков может служить переход к использованию метода оптоэлектронного анализа пространственного спектра Фурье, возникающего при аналоговом преобразовании периодических структур имеющихся на поверхности голограммы.

В настоящей работе представлены результаты разработки метода аппаратного контроля подлинности защитных голограмм, в котором производится сравнение фурье-образов эталонного и проверяемого образцов голограмм.

Как известно, общее изобразительное поле голограммы представляет собой совокупность разночастотных дифракционных решеток, которые располагаются в её определенных областях. Если поместить голограмму в соответствующую оптическую схему, осветить её целиком и произвести преобразование Фурье отражённого волнового фронта, то в частотной плоскости получится картина, состоящая из изображений набора спектральных порядков дифракционных решёток присутствующих в голограмме. Визуально подобный фурье-образ представляет собой набор пар светящихся точек расположенных симметрично относительно центрального максимума или нулевого порядка дифракции.

Оптическая схема, предназначенная для реализации предлагаемого метода, состоит из узла формирования лазерного плоского волнового фронта, устройства для фиксации голограммы, светоделительного кубика и линзы, осуществляющей первичное преобразование Фурье.

Изображение фурье-образа освещенного участка голограммы визуально наблюдается на матовом экране, расположенном в фокальной плоскости фурье-линзы, для его дальнейшего анализа, либо регистрируются на высокоразрешающую ПЗС-матрицу.

Программное обеспечение позволяет находить координаты сфокусированных максимумов в фурье-плоскости. Количество пар максимумов на экране, исключая нулевой порядок, соответствует количеству дифракционных решёток присутствующих на освещённом участке голограммы, которые различаются периодом и/или углом поворота в плоскости. Определив координаты максимумов можно рассчитать параметры дифракционных решёток образующих голограмму. Период соответствующей дифракционной решётки, связанный с расстоянием между порядками дифракции, симметричными относительно максимума нулевого порядка, рассчитывается по общепринятым формулам. Полученный таким образом набор параметров сравнивается с эталонным набором данных.

Применение описанного метода позволит существенно повысить достоверность и надёжность результатов, получаемых при контроле подлинности защитных голограмм, а так же значительно сократить время аппаратного контроля по сравнению с традиционным спектральным методом анализа.

А.Н. ПУТИЛИН¹, А.В. МОРОЗОВ^{1,2}, В.В. ДРУЖИН^{2,3},
П.И. МАЛИНИНА², А.А. БОЛОТОВА⁴, С.С. КОПЁНКИН^{1,4},
С.Е. ДУБЫНИН^{1,2}, Ю.П. БОРОДИН^{1,4}, А.С. ПЕРЕВОЗНИКОВА^{1,3},
К.И. ЛЬВОВА³

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

²*Исследовательский центр Самсунг, Москва*

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

⁴*МИРЭА – Российский технологический университет*

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С БОЛЬШИМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Приведена оптическая схема малогабаритных очков дополненной реальности с использованием голографического оптического элемента. В результате работы был изготовлен носимый прототип, формирующий на расстоянии двух метров полноцветное высококонтрастное изображение с угловым полем 90° по диагонали и соотношением сторон 16:9.

A.N. PUTILIN¹, A.V. MOROZOV^{1,2}, V.V. DRUZHIN^{2,3},
P.I. MALININA², A.A. BOLOTOVA⁴, S.S. KOPENKIN^{1,4},
S.E. DUBYNIN^{1,2}, Yu.P. BORODIN^{1,4}, A.S. PEREVOZNIKOVA^{1,3},
K.I. LVOVA³

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

²*Samsung R&D Institute, Moscow*

³*Bauman Moscow State Technical University*

⁴*MIREA – Russian Technological University, Moscow*

AR-GLASSES OPTICAL SYSTEM WITH LARGE FIELD OF VIEW BASED ON HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

The optical scheme for the compact augmented reality (AR) glasses that utilize holographic optical element (HOE) as a combiner is presented. As the result wearable prototype was produced, that at the distance of 2 m, full-color image with 90° field of view and aspect ratio 16:9.

Последнее время системы дополненной реальности находятся под пристальным вниманием. Интерес представляет увеличение информации в выводимом поле зрения при одновременном сохранении миниатюрности носимого устройства. Для достижения компромисса типичными

решениями являются использование светоделительного кубика [1], сферического полупрозрачного зеркала [2], дифракционных [3] и голографических [4] элементов. Голографический оптический элемент, используемый в оптической схеме, представляет собой линзу, записанную в расходящемся и сходящемся пучках, на материале толщиной 25 μm . Максимальная дифракционная эффективность (ДЭ) элемента в прототипе достигает 90 %, за счет выполнения условия Брэгга. Оптическая система прототипа формирует волновой фронт излучения близкий к волновому фронту опорной волны ГОЭ, что позволяет не только восстанавливать ГОЭ с максимально достижимой ДЭ, но и формировать виртуальное изображение на расстоянии двух метров. В предложенной схеме (рис. 1), в качестве дисплея используется LCoS Raontech, с размером пикселя 6,3 μm и разрешением full-HD 1920x1080 пикселей. В качестве RGB-источника используются лазерные светодиоды Thorlabs с длинами волн 478, 532 и 633 нм. Оптическая система была разработана и оптимизирована с использованием программного обеспечения Zemax Optics Studio (рис. 2). Схема формирует увеличенное изображение дисплея LCoS в непосредственной близости от ГОЭ. Для устранения астигматизма, возникающего из-за использования внеосевого ГОЭ, в схему включена цилиндрическая линза.

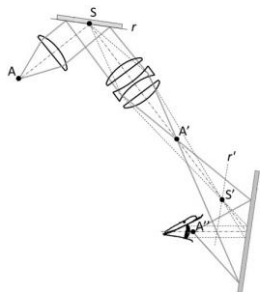


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема

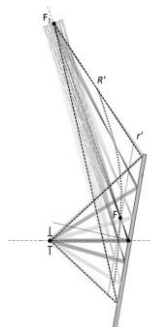


Рис. 2. Zemax моделирование работы ГОЭ (ход лучей от зрочка)

Список литературы

1. Miao X., Wong A., Amirparviz B. // Patent US20130021658A1.
2. Steven S., Zhao Y., et al. Augmented reality display system for smart glasses with streamlined form factor // Proc. SPIE. 2018, V. 10676. P. 1067611.
3. Kress B.C., Cummings W.J. Optical architecture of HoloLens Mixed Reality Headset Microsoft corporation. Redmond, WA, USA, 2017.
4. Kress B.C., Shin M. Diffractive and Holographic optics as optical combiners in head mounted displays. Zurich, Switzerland, 2013.

Я.Е. АКИМОВА, М.В. БРЕЦЬКО, С.И. ХАЛИЛОВ,
А.О. ТИТОВА, Н.В. КУДРЯН

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОМЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ

Представлен новый метод измерения спектра оптических вихрей (квадраты амплитуд и начальные фазы), а также орбитального углового момента без разрезов и склеек волнового фронта массива сингулярных пучков. Такое расширение возможностей измерения свойств комбинированных вихревых пучков достигается посредством регистрации моментов интенсивности светового пучка в целом без разрушения его внутренней структуры. Степень корреляции исходного распределения интенсивности и распределения интенсивности с учетом экспериментально полученного спектра вихрей достигает 91 %, что указывает на надежность представленного метода.

Ya.E. AKIMOVA, M.V. BRETSKO, S.I. HALILOV,
A.O. TITOVA, N.V. KUDRYAN

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

MEASUREMENTS OF A VORTEX SPECTRUM VIA INTENSITY MOMENTS

Presents a new method for measuring the vortex spectrum (amplitude squares and initial phases), as well as the orbital angular momentum without cuts and splices of the wave front of an vortex array. Such an extension of the measurement capabilities of the combined beam properties is achieved by recording the intensity moments of the light beam as a whole without destroying its internal structure. The correlation degree of the initial intensity distribution and intensity distribution, taking into account the experimentally obtained vortex spectrum, reaches 91 %, which indicates the reliability of the presented method.

Среди множества первостепенных проблем современной сингулярной оптики ключевым направлением исследований является формирование сложных сингулярных пучков, их разделение на парциальные вихревые пучки, измерение орбитального углового момента (ОУМ) и спектра оптических вихрей [1]. Эти исследования находят отражение в ряде прикладных задач, например, в системах уплотненной передачи информации через многомодовые оптические волокна [2].

Целью работы является экспериментальное измерение основных характеристик (квадрата амплитуд и начальной фазы) комбинированного сингулярного пучка, формирующегося с помощью голографической амплитудной решётки [3]. Композиция моментов интенсивности образует систему линейных алгебраических уравнений, решения которой и задают квадраты амплитуд и начальные фазы базисных пучков

$$J_{p,q} = \iint_S M_{p,q}(x,y) \mathfrak{I}(x,y) dx dy / \iint_S \mathfrak{I}(x,y) dx dy, \quad (1)$$

где x, y – координаты точки в поперечном сечении S , $M_{p,q}(x,y)$ – функция момента, $\mathfrak{I}(x,y)$ – распределение интенсивности, p, q – целые числа. Для оценки погрешности измерений использовалась функция корреляции между исходным распределением интенсивности $\mathfrak{I}_h(x,y)$ и экспериментальными значениями $\mathfrak{I}_{ex}(x,y)$. Полученные результаты степени корреляции располагаются в интервале $\eta = 0.83 \div 0.91$, что указывает на хорошее согласование теории и эксперимента (рис. 1).

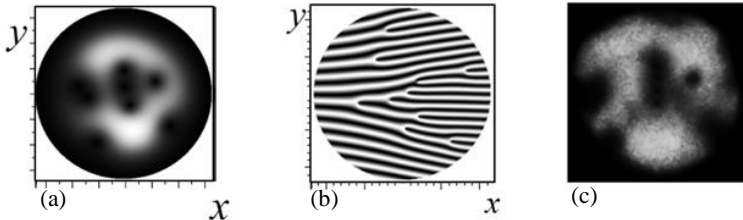


Рис. 1. Типичное теоретическое (а) и экспериментальное (в) распределение интенсивности $\mathfrak{I}(r, \varphi)$ на входном окне CCD1 камеры для массива из $N = 10$ пучков и (б) соответствующая голографическая решетка на SLM модуляторе

Исследование выполнено в рамках поддержанного федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» гранта №ВГ24/2018».

Список литературы

1. Gbur G.J. Singular optics. New York: CRC Press, 2017.
2. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements /ed. V.A. Soifer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
3. Flusser J., Suk T., Zitová B. Moments and Moment Invariants in Pattern Recognition. New York: John Wiley and Sons, Ltd, 2009.

П.В. ПАВЛОВ, И.Э. ВОЛЬФ, Н.В. МОСКВИН

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

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются технические пути построения оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля (НК), принцип действия которого основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения. Представлены результаты натурных испытаний предлагаемого комплекса для задач дефектоскопического контроля авиационных материалов.

P.V. PAVLOV, I.E. WOLF, N.V. MOSKVIN

Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin» Voronezh

OPTICAL ELECTRONIC COMPLEX NDT'S CONTROL OF AIRCRAFT MATERIALS

The technical ways of constructing the optico-electronic complex of non-destructive testing (NC), the principle of which is based on the use of the method of speckle structures of optical radiation, are considered. The results of full-scale tests of the proposed complex for the tasks of flaw detection of aviation materials are presented.

Мировые тенденции в области авиастроения направлены на производство новых материалов, позволяющих добиться высокого соотношения прочность/вес, надежности, а также пониженной коррозионности по сравнению с другими конструкционными материалами. Для контроля технического состояния выпускаемой продукции из новых материалов в производство внедряются новые устройства НК, принцип действия которых основан на ультразвуке, инфракрасной термографии и ширографии. Однако широкое использование данных методов ограничивается рядом факторов, таких как высокая стоимость, низкая чувствительность и невозможность контролировать подповерхностную структуру материала.

За последние несколько лет прослеживается бурное развитие устройств НК, принцип действия которых основан на использовании метода цифровой голографии и спекл-структур оптического излучения. На кафедре Электрооборудования (и оптико-электронных систем) ВУНЦ

ВВС «ВВА» (г. Воронеж), в рамках научного направления по исследованию технических путей построения оптико-электронных систем НК разработан оптико-электронный комплекс, который позволяет осуществлять операции по дефектоскопическому контролю авиационных деталей выполненных из непрозрачных [1], полупрозрачных и композитных материалов [2], а так же осуществлять экспресс-контроль состояния рабочих жидкостей авиационных систем [3].

Разработанный оптико-электронный комплекс неразрушающего контроля состоит из портативного лазерного дефектоскопа и стационарной роботизированной оптической системы. Для управления комплексом и автоматизации процесса дефектоскопического контроля разработано оригинальное программное обеспечение, имеющее в своем составе несколько программных модулей, позволяющих:

- управлять по заданной траектории движения системой позиционирования и зондирования контролируемой поверхности авиационной детали;
- осуществлять регистрацию и принимать решение о параметрах контролируемой поверхности авиационной детали, по анализу параметров регистрируемых цифровых спекл-фотографий;
- определять глубину залегания подповерхностных дефектов в структуре авиационных деталей из композитных материалов;
- определять процентное содержание примесей в составе рабочих жидкостей (керосин, моторное масло, гидравлическая жидкость) по анализу параметров регистрируемых спекл-фотографий.

Таким образом, внедрение разработанного оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля позволит повысить эффективность работ по выполнению дефектоскопического контроля узлов и агрегатов воздушных судов и как следствие повысить безопасность полетов авиапарка государственной авиации России.

Список литературы

1. Колесов С.С., Павлов П.В., Малов А.Н. Метод спекл-структур для диагностики поверхностей деталей // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. 2014. С. 273-274.
2. Павлов П.В., Малов А.Н., Попов Ф.Н. Способ идентификации дефектов во внутренней структуре композитных материалов методом цифровой спекл-фотографии // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. 2017. С. 276-277.
3. Павлов П.В., Малов А.Н., Неупокоева А.В. Определение технического состояния рабочих жидкостей по анализу параметров цифровых спекл-изображений // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. 2018. С. 262-263.

В.Н. БОРИСОВ, В.В. ЛЕСНИЧИЙ¹, А.Б. ДЮРЯГИНА,
Н.А. ШУРЫГИНА, А.В. ВЕНИАМИНОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Университет Фрайбурга, Фрайбург-в-Брайсгау, Германия*

КОМБИНИРОВАННАЯ МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ, ДИФФУЗИИ И УСАДКИ В ХОДЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Работа посвящена разработке комбинированной одномерной модели, описывающей динамику всех пространственных гармоник распределения объёмных долей компонент, присутствующих в фотополимерах в ходе голографической записи. Полученная система описывает совместную динамику полимеризующейся компоненты с учётом генерации и диффузии свободного объёма, вызванного фотополимеризацией, и нейтральной компоненты (НК), в качестве которой могут выступать, например, люминесцентные квантовые точки. Численное решение для вырожденных случаев системы уравнений, хорошо описанных в литературе для первой гармоники модуляции, подтвердило её состоятельность.

V.N. BORISOV, V.V. LESNICHII¹, A.B. DYURYAGINA,
N.A. SHURYGINA, A.V. VENIAMINOV

ITMO University, Saint Petersburg

¹*Albert-Ludwig University of Freiburg, Freiburg in Breisgau, Germany*

COMBINED MULTICOMPONENT MODEL OF PHOTOPOLYMERIZATION, DIFFUSION AND SHRINKAGE PROCESSES DURING HOLOGRAPHIC RECORDING

The work is dedicated to the development of the combined one-dimensional model, which describes the dynamics of components, that are taking part in photopolymerization during holographic recording. Mutual diffusion of monomer and generated by its photopolymerization free volume is accompanied by the purely diffusive motion of a neutral component (for example, quantum dots). Dynamics of all spatial harmonics of corresponding volume fraction distributions were considered. Numerical solution of the model, performed for its degenerated cases and described in the literature for the first spatial harmonic, had assured the model's consistency.

Одна из прикладных областей, в которой успех применения голографических оптических элементов тесно связан именно с динамическими параметрами сред для записи, – это разработка лазеров с

распределённой обратной связью на основе фотополимеров с люминесцирующими наночастицами [1]. Моделирование процессов фотополимеризации в динамике записи интерференционной картины позволяет не только определить оптимальный режим записи, но и заранее выявить некоторые особенности её условий, связанные по отдельности с усадкой [2, 3] и диффузией НК [4].

Присутствие НК, парциального свободного объёма и усадки в целом в различных неполных комбинациях характерно для работ по данной тематике. Целью настоящей работы являлось расширить модель на случаи, включающие все эти комбинации, чтобы учесть их возможное взаимовлияние, и подготовить модель к введению в неё учёта нелокальных эффектов. Решение системы уравнений производилось численно в программном пакете MATLAB методом конечных разностей. Результаты решения были обработаны таким образом, чтобы иметь возможность качественно сравнить их с результатами работ [2, 5, 6]. Качественное совпадение результатов (рис. 1 и 2) свидетельствует в пользу разработанной модели.

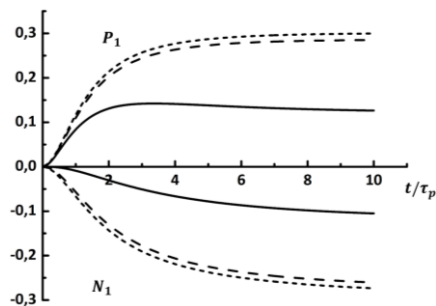


Рис. 1. Амплитуды первых гармоник объёмных долей полимера (P_1) и нейтральной компоненты (N_1) в ходе записи для трёх различных эффективных коэффициентов диффузии D_{eff}

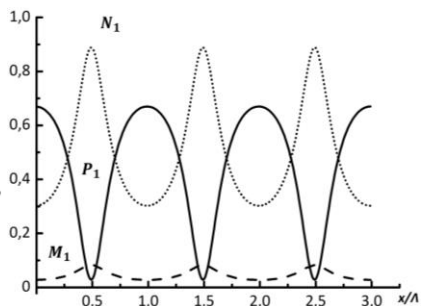


Рис. 2. Пространственное распределение первых гармоник объёмных долей компонент под конец десяти характерных времён полимеризации для $D_{\text{eff}} = 10$, M_1 – мономер

Список литературы

1. Smith D.M., Li C.Y., et. al. // J. Polym. Sci. B. 2013. V. 52. P. 232-250.
2. Karpov H.M., et. al. // Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron. 2015. V. 2. P. 66-70.
3. Kelly J.V., Gleeson M.R., et. al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5939. P. 59390J.
4. Karpov G.M., Obukhovskiy V.V., Smirnova T.N. // Opt. Spectrosc. 1996. V. 81. P. 947.
5. Karpov G.M., Obukhovskiy V.V., Smirnova T.N. // Opt. Spectrosc. 1997. V. 82. P. 131.
6. Kelly J.V. // PhD thesis. University College Dublin. 2006. P. 124-144.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск

УСИЛЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕЛЬЕФНЫХ РЕШЕТОК, ЗАПИСАННЫХ В СЛОЯХ ФОТОСШИВАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ

Предложен способ увеличения глубины модуляции рельефных голографических решеток, записанных в слоях фотосшиваемых полимеров, основанный на дополнительной обработке проявленного рельефа в «плохом» растворителе. Экспериментально продемонстрирован десятикратный рост дифракционной эффективности после дополнительной обработки.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH
Belarusian State University, Minsk

INTENSIFICATION OF HOLOGRAPHIC RELIEF GRATINGS RECORDED IN THE LAYERS OF PHOTO-CROSSLINKING POLYMERS

A method is proposed for increasing the modulation depth of relief holographic gratings recorded in layers of photo-crosslinking polymers, based on the additional processing of the developed relief in a “bad” solvent. A tenfold increase in diffraction efficiency after additional processing was experimentally demonstrated.

Известно, что разрешающая способность негативных фоторезистов, функционирование которых основано на явлении фотосшивания макромолекул, как правило, существенно уступает разрешению позитивных фоторезистов. Это связано, в частности, с неизбежным набуханием при проявлении полимерной сетки, созданной фотосшивками. В результате после проявления записанных периодических структур с периодом даже в несколько микрометров в промежутках между гребнями не происходит усадки материала, пропорциональной его доле, перешедшей в раствор. Слишком редкая полимерная сетка и незначительные силы ее энтропийного сжатия не способны конкурировать с силами, препятствующими усадке. Основываясь на этих представлениях, в настоящей работе мы попытались добиться увеличения разрешающей способности фотосшиваемых полимеров с бензальдегидными группами в боковой цепи при записи голографических решеток (ГР), введя дополнительную стадию жидкостной обработки уже

проявленного рельефного изображения в «плохом» растворителе. Ожидаемый эффект – частичный переход участков полимерных цепей между шивками в редкой сетке в состояние глобулы и появление благодаря этому дополнительных сил сжатия.

В качестве фотосшиваемых полимеров использовались бензальдегидные ориентанты для ЖК материалов [1]. Слои толщиной 0,5-0,6 мкм наносились на стеклянные подложки из жидкого раствора центрифугированием. ГР записывались по симметричной схеме излучением гелий-кадмиевого лазера ($\lambda = 325$ нм), интенсивность в каждом из пучков составляла около 3 мВт/см². Проявление ГР после экспонирования проводили в толуоле, для дополнительной обработки использовали смесь толуола и осадителя. Дифракционную эффективность (ДЭ) определяли на длине волны 0,65 мкм. С помощью интерференционного микроскопа измеряли высоту остаточного полимерного слоя с решеткой после обработки.

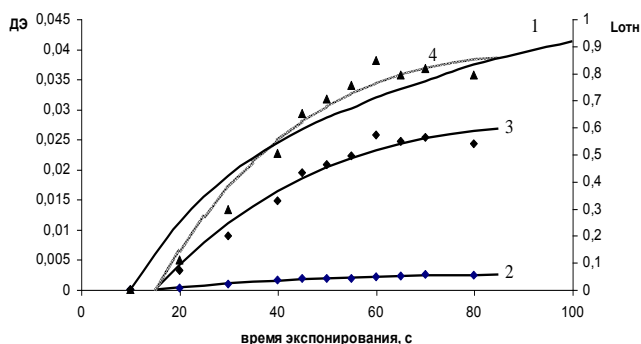


Рис. 1. Зависимости от времени экспонирования при записи ГР относительных толщин полей (нормированы на начальную толщину слоя) (1), ДЭ ГР после проявления (2) и после дополнительной обработки в течение 90 (3) и 630 с (4)

ГР с периодами $d = 0,5-2$ мкм записаны, проявлены и усилены от ДЭ $\sim 0,3$ % до ДЭ $\sim 2-4$ %. На рис. 1 приведены зависимости от времени экспонирования относительной толщины полей с ГР ($d = 0,95$ мкм) и ДЭ после проявления и после усиления различной длительности. Дополнительная обработка позволила повысить ДЭ примерно на порядок, что соответствует более, чем трехкратному росту глубины модуляции фазы зондирующего пучка на ГР.

Список литературы

1. Mahilny U.V., et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 121-125.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ

Институт физико-технических проблем НАН Кыргызской республики, Бишкек

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПРОЯВЛЕНИЯ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЯХ

В работе исследуется температурный режим проявления скрытого изображения голографической записи на фототермопластических (ФТП) носителях при нагреве немодулированным лазерным излучением. Решением нестационарной задачи теплопроводности для многослойных структур получено аналитическое выражение для температуры регистрирующей поверхности в зависимости от теплофизических параметров слоев носителя и от мощности источника нагрева.

N.K. DZHAMANKYZOV, Yu.K. ISMANOV

Institute of Physical and Technical Problems and Material Science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

TEMPERATURE MODE OF DEVELOPMENT OF THE LATENT IMAGE OF HOLOGRAPHIC RECORDING ON PHOTOTHERMOPLASTIC MEDIA

In this paper, we investigate the temperature mode of manifestation of the latent image of holographic recording on photothermoplastic media when heated by unmodulated laser radiation. By solving a non-stationary heat conduction problem for multilayer structures, an analytical expression is obtained for the temperature of the recording surface depending on the thermal parameters of the carrier layers and on the power of the heating source.

Процесс записи голограмм на термопластической пленке основан на деформации поверхности этой пленки в соответствии с распределением интенсивности света согласно регистрируемой голографической интерференционной картине. Однако, получение высококачественных голограмм во многом зависит от температурного режима проявления скрытого изображения, так как в процессе термического проявления происходит дальнейшее, примерно 100-кратное, усиление скрытого изображения. Поскольку процесс проявления скрытого изображения происходит вблизи температуры плавления регистрирующего слоя, то для достижения заданного значения температуры возникает необходимость точного определения зависимости энергии излучения, используемого для

нагрева, от теплофизических, оптических параметров структуры носителя и от скорости (темпа) нагрева, с целью недопущения перегрева или недогрева регистрирующего слоя.

Вышеизложенное предопределило цель настоящей работы [1-5]: теоретическое исследование нестационарной задачи лазерного нагрева многослойную структуры, такой как пленка + пленка + подложка, и нахождение зависимости температуры поверхности ФТП пленки от оптических, теплофизических свойств слоев носителя и от мощности нагревающего источника излучения. В работе были рассмотрены различные случаи нагрева ФТП носителя:

1) прозрачная ФТП пленка, полупрозрачная проводящая пленка и поглощающая подложка;

2) прозрачный ФТП слой и поглощающая проводящая пленка, любая подложка;

3) полупрозрачный ФТП слой и поглощающая проводящая пленка.

В работе были получены аналитические соотношения для температуры ФТП пленки, которые позволяют определять необходимое значение температуры для любого момента времени в течение времени действия импульса, при различных режимах нагрева и в зависимости от теплофизических и оптических свойств материала носителя.

Список литературы

1. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Температурная зависимость дифракционной эффективности голограмм, записанных на фототермопластический носитель // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 586-587.

2. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Распределение температурных полей в фототермопластической среде при записи голограмм // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 282-283.

3. Исманов Ю.Х., Кулмурзаев Н.М., Тургунбаев Н.А. Регистрирующие среды для голографии и радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2014. №1(43). С. 83-87.

4. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. No. 12. P. 7039-7044.

5. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесчеловой радужной голограммы когерентной волной // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.

В.Г. КАМЕНЕВ, Н.А. КАМЕНЕВА

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ZEMAX И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В докладе описывается система для регистрации цифровых голограмм, основанная на использовании телецентрической оптики. Предложена оригинальная схема, основанная на использовании двух телецентрических подсистем. Приводятся результаты исследования характеристик оптической системы с телецентрическим ходом лучей, предназначенной для регистрации цифровых голограмм. Результаты моделирования в среде проектирования ZEMAX предложенной системы и её экспериментальная обработка подтверждают требуемые характеристики.

V.G. KAMENEV, N.A. KAMENEVA

N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

MODELING WITH ZEMAX AND EXPERIMENTAL TESTING TELECENTRIC SYSTEM FOR DIGITAL HOLOGRAM REGISTRATION

The report describes a system for digital holograms registration based on telecentric optics. An original scheme based on the use of two telecentric subsystems is proposed. The research results of the characteristics of the telecentric optical system intended for recording digital holograms are presented. The simulation results in the ZEMAX design environment of the proposed system and its experimental testing confirm the required characteristics.

Для регистрации дисперсной фазы во время ударно-волнового нагружения оптическая система должна обеспечивать перенос голограммы без искажения пропорций и с одинаковым оптическим увеличением в пределах глубины регистрируемой области. Данный эффект обеспечивается в телецентрических системах.

Телецентрические системы содержат два компонента: телепозитив (фокусирующий компонент, формирующий изображение) и теленегатив (компонент, компенсирующий перспективу). Два данных компонента

располагают так, чтобы задний фокус телепозитива был совмещен с передним фокусом теленегатива.

Поскольку данная система предназначена для газодинамических опытов, существует необходимость в наличии в системе уничтожаемого узла, располагаемого в непосредственной близости от исследуемого объекта, и сохраняемого узла, расположенного в защищенном помещении.

Для анализа телецентрического эффекта в среде проектирования ZEMAX была создана решетка $3 \times 3 \times 3$, в узлах которой располагались точечные источники излучения. Была смоделирована телецентрическая система, состоящая из двух телецентрических подсистем – подсистемы увеличения и подсистемы переноса. Область источников излучения, а также области построения промежуточного и конечного изображений были просканированы с помощью прямоугольного детектора. Также была рассчитана ФРТ для промежуточного и конечного изображений.

Результаты моделирования показали, что изображения точечных источников переносятся с одинаковым оптическим увеличением. В изображениях не наблюдаются дисторсия и кривизна поля зрения. Однако по сравнению с исходным источником происходило сильное растяжение промежуточного изображения вдоль оптической оси. Данный эффект характерен для телецентрических систем [1]. Конечное изображение, по сравнению с промежуточным, было сжато в 4 раза вдоль оптической оси.

В серии экспериментальных исследований оптической системы вместо исследуемого объекта устанавливалась мира ГОИ №1. При смещении миры происходит потеря резкости, однако размер изображения остается тем же – таким образом достигается телецентрический эффект.

Вторая серия экспериментальных исследований была посвящена получению и анализу ЧКХ оптической системы. График ЧКХ показывает, что динамический диапазон системы позволяет регистрировать объекты с контрастом до 0,025, следовательно, разрешения системы достаточно для передачи интерференционной структуры. Однако пространственные частоты, лежащие в интервале 150 - 200 штр./мм, передаются со слабым контрастом (менее 0,1), следовательно, периферийные интерференционные кольца могут быть не зарегистрированы в голографическом изображении.

Список литературы

1. Sorenson D.S., Pazuchanics P., Johnson R., et. al. Ejecta particle-size measurements in vacuum and helium gas using ultraviolet in-line Fraunhofer Holography // Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-11-04995. 2014.

П.А. ИВАНОВ

Ярославский государственный технический университет

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ КАЛМАНА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, а также межклассовое распознавание с помощью корреляционных фильтров Калмана. Приводятся данные для некоторых других типов корреляционных фильтров.

P.A. IVANOV

Yaroslavl State Technical University

KALMAN CORRELATION FILTERS IN PROBLEMS OF IMAGES RECOGNITION

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations and several classes' recognition with the usage of Kalman invariant correlation filters are given. There is given data for some other types of correlation filters.

При корреляционном распознавании изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям (поворот, сдвиг, изменение масштаба, сложное искажение формы), выходной корреляционный пик резко деградирует при самых малейших изменениях геометрии распознаваемого объекта по сравнению с эталоном. Поэтому возникает вопрос о выборе эталона. Возможны различные варианты выбора эталонных объектов, довольно привлекательным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1]. Основные алгоритмы синтеза КФ могут быть отнесены к следующим реализациям: 1) алгоритмы синтеза на основе разложений в функциональные ряды; 2) алгоритмы синтеза, в основу которых закладывается вычисление некоторого инвариантного параметра (например, средней энергии корреляции для последовательности изображений одного и того же объекта в разных состояниях); 3) алгоритмы синтеза на основе ядер интегральных преобразований. В данной работе в качестве объекта исследования использовались инвариантные корреляционные фильтры (КФ) Калмана, относящиеся ко второму классу. Были проведены эксперименты по компьютерному

моделированию распознавания изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота и изменению масштаба, а также межклассовому распознаванию изображений.

Рассмотрим алгоритм синтеза фильтра Калмана. В основе алгоритма синтеза лежит вычисление двух функционалов:

$$X_t = \begin{bmatrix} P_{X_{t-1}} + T * V_{X_{t-1}} + \frac{1}{2} * \epsilon_X * T^2 \\ P_{Y_{t-1}} + T * V_{Y_{t-1}} + \frac{1}{2} * \epsilon_Y * T^2 \\ V_{X_{t-1}} + \epsilon_X * T^2 \\ V_{Y_{t-1}} + \epsilon_Y * T^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

здесь P_X, P_Y – геометрическое положение (координаты) распознаваемого объекта (каждого его пиксела), V_X, V_Y – скорости объекта (каждого пиксела) в зависимости от времени для последовательно предъявляемых на вход системы объектов в разных состояниях, T – время между предъявлением последовательных изображений объекта, ϵ_X, ϵ_Y – среднеквадратические отклонения соответствующих координат, δ_X, δ_Y – уровень шума

$$Z_t = \begin{bmatrix} P_{X_t} + \delta_{X_t} \\ P_{Y_t} + \delta_{Y_t} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После вычисления функционалов строится фильтр $H = \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix}$.

Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций набора входных изображений с фильтром, нормированные на величину максимального пика (количественные характеристики корреляции).

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение фильтров Калмана 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.
2. Иванов П.А. Квадратичные и полиномиальные корреляционные фильтры в задачах распознавания изображений на базе оптоэлектронных процессоров. // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 12. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017. С. 219-227.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Представлены результаты компьютерного моделирования работы оптического коррелятора с бинарным выводом голограмм инвариантных корреляционных фильтров с оптимизацией параметров. Показано влияние бинаризации на ошибку при распознавании полутоновых изображений. Рассмотрены различные варианты зависимости пространственных распределений фазы бинарного амплитудного модулятора от координат.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

INVESTIGATION OF BINARY REPRESENTATION OF INVARIANT CORRELATION FILTERS HOLOGRAMS IN PATTERN RECOGNITION TASKS

The results of computer simulation of optical correlator with binary output of invariant optimal trade-off correlation filters holograms are presented. The binarization effect on grayscale images recognition quality is shown. The cases of various spatial phase distributions of binary amplitude modulator dependences on coordinates are considered.

Корреляционное распознавание образов – один из методов решения задачи распознавания (классификации и локализации) объектов. Главное преимущество данного метода – высокая скорость, достигаемая, в первую очередь, за счет использования пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) в оптических корреляторах для вывода корреляционных фильтров (КФ). Наибольший интерес в данном отношении представляют микрзеркальные ПВМС, производящие бинарную амплитудную модуляцию с частотой до 32 кГц.

Так как инвариантные корреляционные фильтры обычно представлены в виде комплексных матриц, для вывода на микрзеркальные ПВМС их необходимо преобразовать в бинарный амплитудный вид. Одним из способов преобразования в амплитудный вид является синтез фурье-голограммы КФ [1], однако такая голограмма представляет собой

изображение с числом градаций интенсивности больше 2 (примеры представлены на рис. 1). Для её вывода на бинарный ПВМС необходимо воспользоваться методами бинаризации изображений.

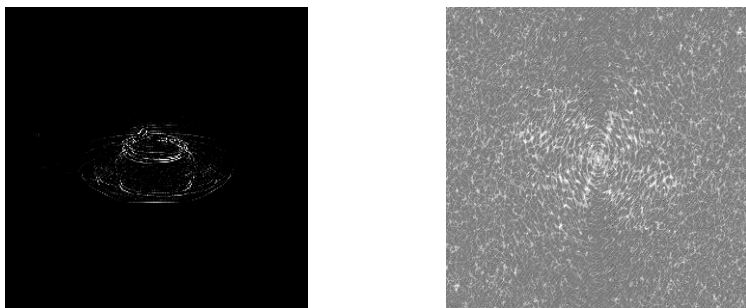


Рис. 1. Пример КФ (слева) и его фурье-голограммы (справа)

В данной работе произведено компьютерное моделирование распознавания полутоновых изображений с помощью оптического коррелятора на базе микрозеркального ПВМС в качестве устройства ввода КФ. Были использованы следующие фильтры MACH (maximum average correlation height) [2] и MINACE (minimization of noise and average correlation energy) [1], а в качестве методов бинаризации рассмотрены глобальные (фиксированный порог, средний порог, IsoData, Li, Otsu, Triangle) и локальные (адаптивный средний порог, Bradley, Niblack, Sauvola) методы бинаризации. Показано, что для большого числа экспериментов бинаризация не приводит к увеличению ошибки распознавания по сравнению с «идеальным» случаем (компьютерный расчет корреляции между КФ и изображениями).

Как показано в [3], неоднородность поверхности микрозеркального ПВМС приводит к пространственно-неоднородному фазовому распределению модулируемого по амплитуде излучения. Было проведено моделирование распознавания полутоновых изображений в случаях различных профилей поверхности микрозеркального ПВМС, результаты свидетельствуют о незначительном росте ошибки распознавания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-07-00829.

Список литературы

1. Shaulskiy D.V., et. al. // Proc. SPIE. 2015. V. 9598.
2. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. // Opt. Eng. 2008. V. 47(6).
3. Molodtsov D.Yu., et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 338-342.

А.А. САРЫБАЕВА

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В данной работе приведены результаты исследования эффективности оптической системы распознавания на принципах двунаправленной ассоциативной памяти на примере решения задачи распознавания изображений при различной степени искажения.

A.A. SARYBAEVA

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek

EVALUATION OF OPTICAL IMAGE RECOGNITION METHODS EFFECTIVENESS

This paper presents the results of researches of efficiency of the proposed optical image recognition system based on the principles of bidirectional associative memory on the example of image recognition with different degrees of distortion.

Оптические методы реализации двунаправленной ассоциативной памяти хорошо подходят для решения задач распознавания, и эти достоинства привлекают внимание исследователей при разработке оптических систем обработки информации [1]. Как отмечено в работе [0], при распознавании изображений, искажение которых достигало до 50 % заметно снижается надежность систем распознавания и точность распознавания изображений составляло в среднем 68 %. Для повышения эффективности системы распознавания разработана модифицированная модель двунаправленной ассоциативной памяти (МДАП), а также предложена схема оптической реализации двунаправленной ассоциативной памяти на принципах голографии (рис. 1).

Проведены эксперименты по распознаванию изображений для оценки эффективности предложенной оптической системы. В экспериментах использовался набор из 20 изображений, искажение которых достигало от 10 до 60 %. Ниже на рис. 2 приведены результаты сравнительного анализа точности распознавания изображений.

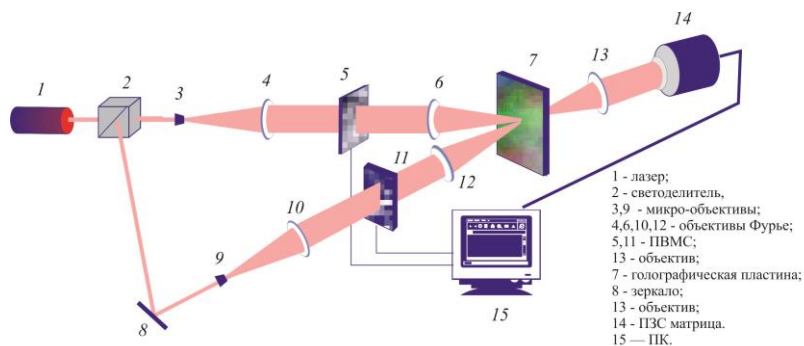


Рис. 1. Схема оптической системы распознавания изображений

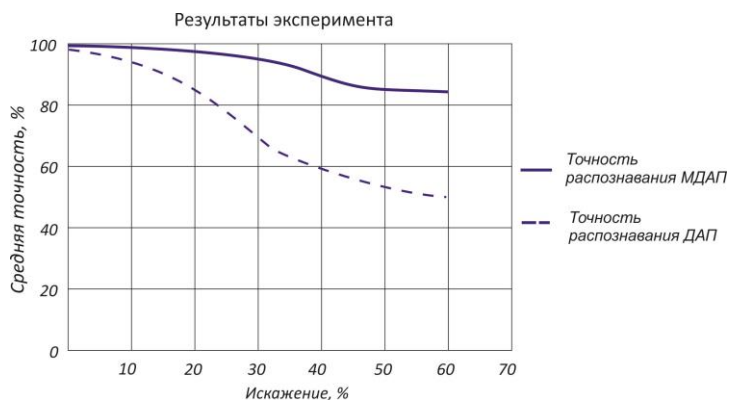


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментов показали, что средняя точность распознавания изображений увеличилась с 68 до 89 %. Экспериментальные результаты демонстрируют высокую точность методов распознавания изображений.

Список литературы

1. Васильев В.Н., Павлов А.В. Оптические технологии искусственного интеллекта. СПбГУ ИТМО, 2005.
2. Сарыбаева А.А. Оптические методы реализации двунаправленной ассоциативной памяти // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 1-2. С. 58-62.

Е.Д. МИНАЕВА, В.В. КРАСНОВ, В.Г. РОДИН,
П.А. ЧЕРЁМХИН, А.В. ШИФРИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН

Для задачи оптического отображения трехмерных сцен рассмотрены различные методы синтеза дифракционных оптических элементов, формирующих наборы плоских сцен. Результаты моделирования продемонстрировали возможность создания качественных 3D-сцен, состоящих из десятков плоскостей.

E.D. MINAEVA, V.V. KRASNOV, V.G. RODIN,
P.A. CHEREMKHIN, A.V. SHIFRINA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

ANALYSIS OF PHASE DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS SYNTHESIS METHODS FOR 3D-SCENES RECONSTRUCTION

Various phase diffraction optical elements synthesis methods for the visualization of sets of flat scenes are considered for the problem of three-dimensional scenes displaying. The obtained results demonstrate the possibility for generation of high-quality three-dimensional scenes consisting of dozens of planes.

Задача оптического отображения 3D-сцен возникает в различных областях науки и техники [1]. Среди основных методов воспроизведения 3D-сцен можно отметить использование пространственно-временных модуляторов света жидкокристаллического или микрзеркального типа, отображающих дифракционные оптические элементы (ДОЭ). К числу сложностей реализации таких методов относится ухудшение качества восстанавливаемого объемного изображения при увеличении количества сечений, формирующих сфокусированные элементы сцены.

С целью повышения качества восстановления были проанализированы различные методы синтеза ДОЭ: метод суперпозиций [2], метод Герчберга-Сэкстона и его разновидности [3, 4], метод «пинг-понг» [5, 6], метод на основе невыпуклой оптимизации и его разновидности [7]. Методы различаются алгоритмами расчета элементарных дифракционных элементов для каждой из плоскостей и составляющих полученных ДОЭ.

Рассмотренными методами были синтезированы фазовые ДОЭ, которые содержали трехмерные сцены, включающие в себя от 2 до 15 плоских сцен. На рис. 1 представлены примеры исходной трехмерной сцены, состоящей из 5 плоскостей (а), результатов восстановления изображений с фазового ДОЭ, синтезированного методом суперпозиций (б) и методом на основе невыпуклой оптимизации (в). Метод суперпозиций является наименее вычислительно ресурсоемким, тогда как метод на основе невыпуклой оптимизации дает наилучшее качество восстановления.

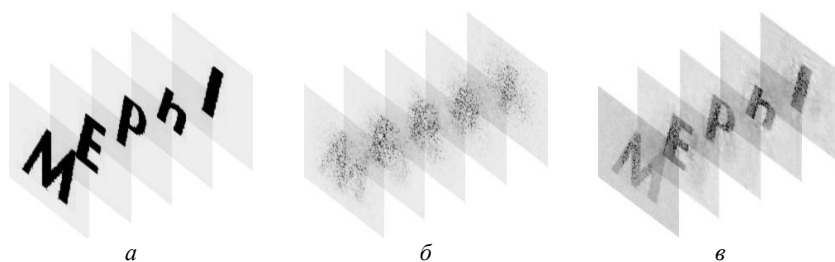


Рис. 1. Трехмерная сцена, содержащая 5 плоскостей: в исходном виде (а), восстановленная с элементов, синтезированных методами суперпозиций (б) и на основе невыпуклой оптимизации (в)

Качество полученных изображений оценивалось как визуально, так и на основе количественных параметров. Среднее значение коэффициента корреляции по Пирсону для метода суперпозиций составило 0,29 (объекты визуально слабо различимы), в то время как для метода на основе невыпуклой оптимизации – 0,71 (объекты визуально хорошо различимы).

Полученные результаты демонстрируют возможность создания дифракционных оптических элементов для формирования качественных обменных сцен, состоящих из десятков плоских изображений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-07-00829.

Список литературы

1. Smalley D, Nygaard E., Squire K., et al. // Nature. 2018. V. 553. P. 486-490.
2. Leonardo R.D., Ianni F., Ruocco G. // Opt. Express. 2011. V. 38. P. 1913-1922.
3. Сойфер В.А. и др. Дифракционная компьютерная оптика. М.: Физматлит, 2007.
4. Makowski M., Sypek M., Kolodziejczyk A., et. al. // Opt. Eng. 2007. V. 46. P. 045802.
5. Dorsch R.G., Lohmann A.W., Sinzinger S. // Appl. Opt. 1994. V. 33(5). P. 869-875.
6. Ying C.-F., Pang H., Fan C.-J., et. al. // Opt. Eng. 2011. V. 5. P. 055802.
7. Zhang J., Pégard N., Zhong J., et. al. // Optica. 2017. V. 4. P. 2334-2536.

Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ, Л.А. БОБРЕВА,
С.А. КЛИМИН¹

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
¹Институт спектроскопии РАН, Троицк*

КОМПЛЕКСНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Методом НТТSSG из конгруэнтного расплава с добавлением флюса 6.0 мас. % K_2O можно получать монокристаллы $LiNbO_{3\text{стех}}$. Дефектности подрешетки протонов будут схожи с монокристаллами $LiNbO_{3\text{стех}}$, выращенными из расплава с 58.6 мол.% Li_2O , но более оптически и структурно однородны.

N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV, L.A. BOBREVA,
S.A. KLIMIN¹

*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
¹Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

COMPLEX DEFECTS IN THE STOICHIOMETRIC $LiNbO_3$ CRYSTALS

By НТТSSG method from a congruent melt with the addition of a flux of 6.0 wt. % K_2O can be obtained stoichiometric single crystals of $LiNbO_3$. Defects of the proton sublattice will be like a stoichiometric single crystal $LiNbO_3$ grown from a melt with 58.6 mol.% Li_2O , but more optically and structurally uniform.

Актуальной задачей является развитие методов исследования состава и тонких особенностей строения монокристаллических материалов для сопровождения технологий их получения. В данной работе по спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп и спектрам комбинационного рассеяния света (КРС) в области двухчастичных состояний акустических фононов с суммарным волновым вектором, равным нулю, исследованы особенности дефектной структуры стехиометрических ($R = Li/Nb = 1$) монокристаллов ниобата лития ($LiNbO_3$), выращенных двумя способами: из расплава с 58.6 мол. % Li_2O ($LiNbO_{3\text{стех}}$) и методом НТТSSG (High temperature top speed solution growth) из конгруэнтного расплава с добавлением 4.5 и 6.0 мас. % щелочного флюса K_2O .

При изменении состава от конгруэнтного ($R = 0.946$) до стехиометрического ($R = 1$) наблюдается сужение всех полос в спектре и уменьшение интенсивностей полос с частотами 3480 и 3488 см^{-1} (рис. 1). Этот факт свидетельствует об упорядочении подрешетки протонов в кристалле при приближении состава к стехиометрическому, уменьшении количества точечных дефектов Nb_{Li} и V_{Li} и связанных с ними комплексных водородсодержащих дефектов. При этом уменьшается интенсивность линии в области 120 см^{-1} , соответствующей двухчастичным состояниям акустических фононов, являющейся удобной аналитической линией для оценки акустической добротности кристалла LiNbO_3 . Спектры кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ и $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ (6.0 мол. % K_2O), рис. 1, практически идентичны, что свидетельствует об одинаковой локализации протонов в этих кристаллах и об одинаковых значениях квазиупругих постоянных связей О-Н.

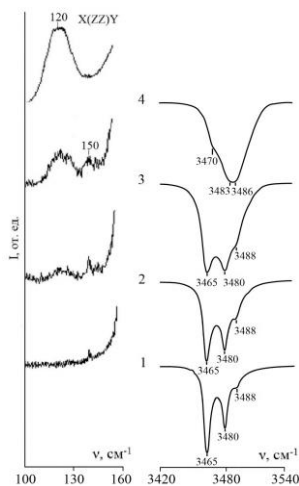


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения и спектры КРС монокристаллов: 1 - $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, 2 - $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ (6.0% мас. % K_2O), 3 - $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ (4.5% мас. % K_2O), 4 - $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$

Метод НТТSSG выращивания стехиометрических кристаллов из конгруэнтного расплава с добавлением 6 мас. % флюса K_2O позволяет получать такие же по составу стехиометрические кристаллы, как и метод выращивания из расплава с 58.6 мол. % Li_2O , но отличающиеся от них однородным показателем преломления вдоль оси роста.

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, А.Е. МАНДЕЛЬ,
А.Ж. НОРМАТОВ, Ж.Т. ЭРГАШЕВ,
А.Р. АХМАТХАНОВ¹, В.Я. ШУР¹

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

**БРЭГГОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТА
НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ
С НАКЛОННЫМИ ДОМЕННЫМИ СТЕНКАМИ
В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Представлены результаты экспериментального исследования распределения интенсивности света в брэгговских максимумах различных порядков при дифракции лазерного гауссова пучка на сформированной электрической переполаризацией в кристалле $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$ периодической доменной структуре с наклонными доменными стенками.

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, A.E. MANDEL,
A.Zh. NORMATOV, Zh.T. ERGASHEV,
A.R. AKHMATKHANOV¹, V.Ya. SHUR¹

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

**BRAGG LIGHT DIFFRACTION ON PERIODIC DOMAIN
STRUCTURE WITH INCLINED DOMAIN WALLS
IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

We experimentally investigated the distribution of light intensity in the Bragg maxima of different orders, which are observed at the diffraction of a Gaussian laser beam on the periodic domain structure with inclined domain walls. That structure had been developed in the $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$ crystal by using the electric-field poling method.

Наклон доменных стенок относительно полярной оси в периодических доменных структурах (ПДС), создаваемых в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития для реализации устройств преобразования спектральных характеристик лазерного излучения и электрооптического управления его временными и пространственными характеристиками [1], определяет их электрический заряд и электрическую проводимость [2]. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования брэгговской дифракции света на ПДС с доменными

стенками, параллельными плоскости YZ , имеющей пространственный период $\Lambda=8.79$ мкм и сформированной методом электрической переполяризации в монокристаллическом образце $\text{LiNbO}_3:5\%\text{MgO}$.

В экспериментах использовался зондирующий пучок от He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм и гауссовым распределением интенсивности, фокусируемый сферической линзой с фокусным расстоянием 600 мм в середину исследуемого образца с размером $h = 1$ мм вдоль полярной оси Z и толщиной $d = 2$ мм вдоль оси Y , размещаемого на поворотном столике. Фотографии наблюдаемых в дальней зоне при распространении данного пучка под углом Брэгга θ_{Bm} к оси Y дифракционных максимумов порядков $m = 1, 2, 3$ и 4 представлены на рис. 1.

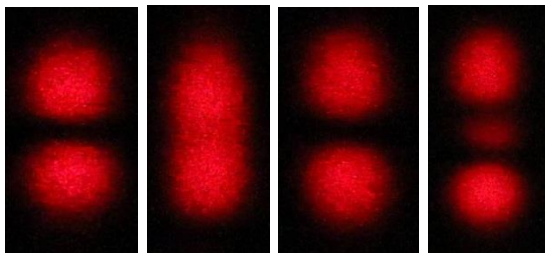


Рис. 1. Фотографии дифракционных максимумов Брэгга порядка $m = 1, 2, 3$ и 4 : нумерация – слева направо; ориентация оси Z – вертикальная, X – горизонтальная

Наблюдаемое разделение дифракционных максимумов вдоль полярной оси Z кристалла можно объяснить одновременной дифракцией Брэгга на двух системах доменных стенок. Для одной из них спонтанная поляризация вдоль координаты x изменяется с $-P_s$ на P_s , а для другой с P_s на $-P_s$. Эти системы стенок имеют противоположные знаки углов наклона к полярной оси, которые были оценены как $\pm 0,3^\circ$, а также характеризуются противофазными вкладами в возмущения оптических свойств кристалла. В связи с этим, распределения светового поля в брэгговских максимумах нечетных порядков вдоль полярной оси кристалла (см. рис. 1) описываются антисимметричными функциями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания на 2017-2019 годы (проекты №3.8898.2017/8.9 и № 3.1110.2017/4.6) и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

Список литературы

1. Ferroelectric Crystals for Photonic Applications / ed. by P. Ferrari, S. Grilli, P. De Natale. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
2. Schröder M., Haussman A., Thiessen A., et al. // Adv. Funct. Mater. 2012. V. 22. P. 3936.

Е.А. АНТОНЫЧЕВА, 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.*

ФОТОРЕФРАКТИВНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ДВОЙНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Приведены результаты экспериментов по фоторефрактивному рассеянию света в кристаллах ниобата лития с двойным легированием $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$.

E.A. ANTONYCHEVA, 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 Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

PHOTOREFRACTIVE LIGHT SCATTERING IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS DOPED DOUBLE IMPURITIES

Effects of experiments on фоторефрактивному to light dispersion in crystals ниобата lithium with double doping $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$.

На основе фоторефрактивного эффекта работает множество приборов и устройств [1]. Кристалл ниобата лития является фазой переменного состава и имеет широкую область гомогенности на фазовой диаграмме [2]. Благодаря этому свойствами кристалла ниобата лития можно управлять путем легирования различными примесями в различных концентрациях [3, 4]. Вызывает интерес легирование кристаллов ниобата лития двойными примесями в целях создания оптически прочных кристаллов с очень малым фоторефрактивным эффектом. Такие кристаллы были бы эффективными для работы в мощных лазерах в области нелинейной оптики для обращения волнового фронта, преобразования излучения генерации гармоник и т.п.

Целью работы является экспериментальное исследование фоторефрактивных свойств кристаллов с двойным легированием $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$ методом фоторефрактивного рассеяния света (по значению

индикатрисы рассеяния). При облучении кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$ [0,24:0,63 мас. %] лазерным излучением $\lambda = 532$ нм, плотностью мощности $6,29$ Вт/см², на экране за кристаллом появляется трехслойная спекл-картина вытянутая в виде симметричной восьмерки вдоль полярной оси кристалла [5]. На рис. 1 показана зависимость угла рассеяния от времени облучения после 20 минут облучения кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Y:Mg}$ [0,24:0,63 мас. %]. При этом наблюдается частичное уменьшение индикатрисы рассеяния (рис. 1).

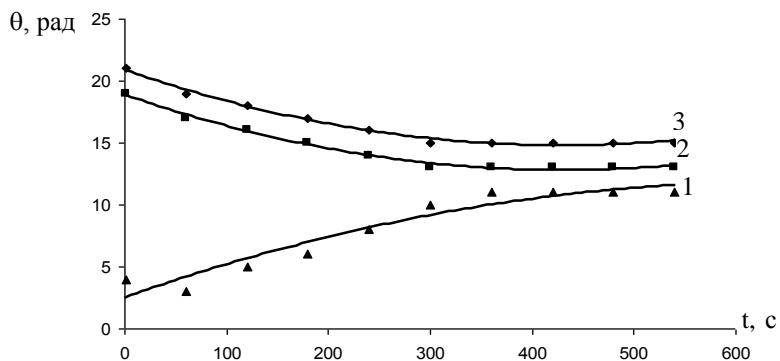


Рис. 1. Зависимость угла фоторефрактивного рассеяния света от времени в кристалле $\text{LiNbO}_3:(\text{Y}+\text{Mg})$ (0,24 мас. % + 0,63 мас. %):
 1 - 1 (центральный) слой спекл-картины; 2 - 2 слой спекл-картины;
 3 - 3 слой спекл-картины

Таким образом, сочетание катионов Y^{3+} и Mg^{2+} в структуре ниобата лития дают частичное понижение эффекта фоторефракции в процессе облучения. В этой связи интересен вопрос подбора соответствующих концентраций для полного гашения фоторефрактивного эффекта.

Список литературы

1. Günter P., Huignard J.-P. Photorefractive Materials and Their Applications 2 Basic effects. NY.: Springer Science + Business Media, LLC, 2007.
2. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975.
3. Antonicheva E.A., Syuy A.V., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., Bormanis K. // Ferroelectrics. 2011. V. 417(01). P. 53-57.
4. Buse K. // Appl. Phys. 1997. V. 64. P. 273-291.
5. Сидоров Н.В., Сюй А.В., Палатников М.Н., Калинин В.Т. // Доклады академии наук. 2011. Т. 437. № 3.С. 352-355.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ¹, Н.А. ТЕПЛЯКОВА¹,
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.*

КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ LiNbO₃:Zn

Методом лазерной коноскопии выполнены исследования оптической однородности серии сильно легированных кристаллов LiNbO₃ (4.46–4.69 мол. % ZnO). Зарегистрировано отсутствие дополнительных аномалий в коноскопических картинах при увеличении мощности лазерного излучения, обусловленных наличием статических и флуктуирующих дефектов, наведенных в фоторефрактивном кристалле лазерным излучением

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV¹, N.A. TEPLYAKOVA¹,
M.N. PALATNIKOV¹

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

CONTROL OF OPTICAL HOMOGENEITY OF STRONGLY DOPED LiNbO₃:Zn CRYSTALS

Optical homogeneity of a series of heavily doped LiNbO₃ crystals (4.46–4.69 mol.% ZnO) was studied using laser conoscopy. The absence of additional anomalies in conoscopic patterns with increasing laser power due to the presence of static and fluctuating defects induced by laser radiation in a photorefractive crystal has been recorded.

Снижение фоторефрактивного эффекта можно получить путем легирования конгруэнтного кристалла LiNbO₃ (R = Li/Nb = 0.946) “нефоторефрактивными” катионами Zn²⁺, однако, легирование, особенно при концентрациях легирующей добавки близкой к пороговому значению, приводит к оптической и структурной неоднородности монокристалла.

Предварительный анализ картин фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) указанных кристаллов до отжига в закороченном состоянии показал более высокую дефектность кристаллов LiNbO₃:Zn²⁺ (4.52 мол. % – твердофазное легирование и 4.69 мол. % – гомогенное легирование) по

сравнению с кристаллами $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.46 и 4.61 мол. % – твердофазное легирование). Особенно сильно выражена дефектность для кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.69 мол. % – гомогенное легирование).

Коноскопические (интерференционные) картины высокого качества размером до 0,5 м, получаемые на полупрозрачном экране при прохождении расходящегося пучка излучения через кристаллические пластинки, помещенные между скрещенными поляризатором и анализатором, позволяют выполнить детальный анализ тонких особенностей структурных искажений в кристаллах, как в центре поля зрения, так и на периферийной области коноскопических картин.

Результаты исследования оптической однородности кристаллов методом лазерной коноскопии показали наличие двух видов коноскопических картин (характерных для одноосного кристалла, а также коноскопических картин с признаками аномальной оптической двуосности) для всех образцов как при малой мощности лазерного излучения 1 мВт, так и при увеличении ее до 90 мВт. Практически все коноскопические картины имеют дополнительные аномалии в виде деформаций, разрыва колец-изохром, а также дополнительные интерференционные полосы, что может быть обусловлено наличием в кристаллах пространственных структурных дефектов, искажениями оптической индикатрисы, вызванные механическими напряжениями или композиционной неоднородностью кристалла.

Для всех кристаллов не обнаружено появления дополнительных аномалий в коноскопических картинах при увеличении мощности лазерного излучения до 90 мВт, обусловленных наличием статических и флуктуирующих дефектов, наведенных в фоторефрактивном кристалле лазерным излучением, что хорошо согласуется с результатами исследования ФИРС в этих кристаллах. Отличия коноскопических картин от идеальных обусловлены структурной неоднородностью кристаллов.

Применение гомогенного легирования при выращивании кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.46–4.69 мол. %), согласно результатам лазерной коноскопии, привело к ухудшению оптического качества кристаллов, по сравнению с кристаллами, выращенными при использовании твердофазного легирования. После отжига в закороченном состоянии кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.46–4.69 мол. %) коноскопические картины, как при малой, так и при большой мощности лазерного излучения, указывают на большую оптическую однородность, по сравнению с кристаллами $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.46–4.69 мол. %) до отжига, за исключением кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Zn}^{2+}$ (4.61 мол. %).

С.М. КОСТРИЦКИЙ, Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ,
О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ¹, И.М. ЧИРКОВА¹, Э.П. КОКАНЯН²

НПК «Оптолинк», Зеленоград

¹*Кемеровский государственный университет*

²*Армянский государственный педагогический университет им. Х. Абовяна, Ереван*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОТОННО-ОБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ В КРИСТАЛЛАХ LiNbO₃

Фазовый состав волноводов определён на основе данных спектроскопии микро-КРС. Установлено, что электрооптические свойства волноводов зависят от их фазового состава, который изменяется модификацией процесса изготовления. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления модуляторов на основе канальных волноводов в кристаллах LiNbO₃.

S.M. KOSTRITSKII, Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV,
O.G. SEVOSTYANOV¹, I.M. CHIRKOVA¹, E.P. KOKANYAN²

RPC Optolink, Zelenograd

¹*Kemerovo State University*

²*Armenian State Pedagogical University, Yerevan*

EVALUATION OF PHASE COMPOSITION OF PROTON-EXCHANGED WAVEGUIDES IN LiNbO₃ CRYSTALS

The phase composition of waveguides was determined by micro-Raman spectroscopy. Electro-optical properties of the waveguides are found to be depending on their phase composition that was changed intentionally by variation of technological conditions. These experimental findings allowed for the optimization of technology for production of phase modulators based on channel waveguides in LiNbO₃ crystals.

В настоящее время, наибольшее применение в интегрально-оптических устройствах, использующих электрооптические кристаллы LiNbO₃, нашли канальные волноводы [1, 2]. Однако методы ИК-спектроскопии, широко используемые для планарных волноводов [3, 4], не позволяют определить фазовый состав канальных оптических волноводов, из-за их малого размера (в нашем случае ширина канала составляла от 5,6 до 6,8 мкм). Поэтому, наиболее распространённым подходом является использование так называемых «тестовых образцов» планарных волноводов, изготавливаемых одновременно с канальными

интегрально-оптическими элементами, т.е. тестовый образец и элемент помещались в один реактор при протонном обмене (ПО). При этом предполагалось, что каналный волновод имеет такой же фазовый состав $H_xLi_{1-x}NbO_3$, как и планарный тестовый образец. Однако, в случае узких каналных ПО волноводах, концентрация протонов x меньше, чем в планарных волноводах, и, поэтому, фазовые составы этих волноводов могут различаться [2]. Всё вышесказанное указывает на необходимость разработки неразрушающего метода для определения фазового состава и, следовательно [3], для оценки электрооптических (ЭО) коэффициентов для каналных ПО волноводах. Для решения этой задачи мы использовали спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС), так как спектры КРС различных фаз $H_xLi_{1-x}NbO_3$ существенно различаются [3], а использование конфокального микроскопа в микро-КРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение (≤ 1 мкм), достаточное для детального исследования каналных волноводов и интегрально-оптических схем на их основе.

Для калибровки данных микро-КРС, мы использовали образцы планарных волноводов, фазовый состав и ЭО свойства которых были определены методами ИК- и УФ-спектроскопии [3, 4]. Это позволило установить чёткие корреляции между параметрами спектров микро-КРС и значениями ЭО коэффициентов r_{13} , что было использовано нами для оптимизации условий изготовления фазовых ЭО модуляторов на основе каналных ПО волноводов в кристаллах $LiNbO_3$. Обнаружена зависимость фазового состава волноводов от стехиометрии исходных кристаллов. Был исследован диапазон значений Li/Nb от 0,936 до 0,950, близкий к конгруэнтному составу [5].

Использование спектроскопии микро-КРС позволяет проведение экспресс анализа ЭО свойств ПО волноводов, так как отпадает необходимость проведения ряда сложных и трудоёмких технологических операций (полировки торцов, оптической стыковки и нанесения электродов) с интегрально-оптическими элементами, что требуется для проведения оптимизации технологии при использовании прямых измерений ЭО эффективности волноводов.

Список литературы

1. Castaldini D., Bassi P., Tascu S., Aschieri P., De Micheli M.P., Baldi P. // J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. P. 1588-1593.
2. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. // Proc. SPIE. 2013. V. 9065. P. 90650E.
3. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. // Ferroelectrics. 2012. V. 440. P. 47-56.
4. Kuneva M., Tonchev S. // Bulgarian Chemical Communications. 2011. V. 43. P. 276-287.
5. Kokanyan E., Dieguez E. // J. Optoelectr. & Adv. Materials. 2000. V. 2. P. 205-214.

В.В. ПОПОВ^{1,2}, А.П. МЕНУШЕНКОВ¹, А.Ю. МОЛОКОВА¹,
Н.В. БОЙКО¹, Е.В. ХРАМОВ², И.В. ЩЕТИНИН³,
М.В. ЖЕЛЕЗНЫЙ³, К.В. ПОНКРАТОВ⁴, В.В. КУРИЛКИН⁵,
Н.А. ЦАРЕНКО⁶, Л.А. АРЖАТКИНА⁶

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСЦ»,
Москва

⁴ООО «Ренишоу», Москва

⁵Российский университет дружбы народов, Москва

⁶Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии, Москва

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ, ЛОКАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУР ТИТАНАТОВ ЕВРОПИЯ $\text{Eu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ И EuTiO_3

Приведены результаты экспериментов по синтезу порошков $\text{Eu}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ и $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$, а также комплексного исследования их кристаллической, локальной и электронной структур с помощью рентгеновской дифракции, спектроскопии рентгеновского поглощения (XANES и EXAFS), ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), люминесценции и синхронного термического анализа (СТА).

V.V. POPOV^{1,2}, A.P. MENUSHENKOV¹, A.Yu. MOLOKOVA¹,
N.V. BOYKO¹, E.V. KHRAMOV², I.V. SHCHETININ³,
M.V. ZHELEZNYI³, K.V. PONKRATOV⁴, V.V. KURILKIN⁵,
N.A. TSARENKO⁶, L.A. ARZHATKINA⁶

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

²National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow

⁴Renishaw plc, Moscow

⁵Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

⁶Leading Scientific Research Institute of Chemical Technology, Moscow

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF CRYSTAL, LOCAL AND ELECTRONIC STRUCTURES OF EUROPIUM TITANATES $\text{Eu}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ AND EuTiO_3

A complex study of the synthesis of $\text{Eu}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ and $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$ powders and their crystal, local and electronic structures has been performed on the basis of X-ray

diffraction, X-ray absorption spectroscopy (XANES and EXAFS), IR- and Raman-spectroscopy, luminescence spectra, and simultaneous thermal analysis (STA) data.

Сложные оксиды РЗЭ $\text{Ln}_2^{3+}\text{M}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{La} - \text{Gd}$; $\text{M} = \text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}$) со структурой пироклора, а также соединения $\text{Eu}^{2+}\text{MO}_3$ со структурой перовскита благодаря набору уникальных физико-химических свойств интересны как с научной, так и практической точек зрения и в последнее время привлекают внимание многочисленных исследователей [1, 2].

Целью работы являлось синтез порошков $\text{Eu}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ и $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$, а также комплексное исследование их кристаллической, локальной и электронной структур с помощью рентгеновской дифракции, спектроскопии рентгеновского поглощения (XANES и EXAFS), ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), люминесценции и синхронного термического анализа (СТА).

Исходные прекурсоры, синтезируемые из растворов с помощью комбинации золь-гель метода и соосаждения, представляли собой рентгеноаморфные порошки смешанных основных карбонатов Eu-Ti . Их изотермический отжиг на воздухе при $1000^\circ\text{C}/3$ ч приводил к образованию порошков $\text{Eu}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ белого цвета с ГЦК структурой пироклорного типа (пр. гр. $Fd\bar{3}m$, № 227) с примесью фазы TiO_2 в виде рутила. Дальнейшее восстановление этих образцов в токе водорода при $1000^\circ\text{C}/4$ ч приводило к получению однофазных крупнокристаллических (ОКР 160 нм) порошков $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$ черного цвета с кубической перовскитной структурой (пр. гр. $Pm\bar{3}m$, № 221). Исследование методами XANES-спектроскопии и СТА подтвердило полное восстановление катионов $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$. Повторный нагрев образцов $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$ в токе воздуха вызывал их полное окисление (в интервале $335-550^\circ\text{C}$) катионов $\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$. Это соответствовало экзотермическому процессу с максимумом при 390°C на кривой ДСК.

Исследование локальной структуры образцов показало, что в случае $\text{Eu}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ наблюдается расщепление первой координационной сферы (КС) Eu-O на 2 составляющие, соответствующие 2 коротким (2.21 Å) связям $\text{Eu-O}(2)$ и 6 длинным (2.45 Å) связям $\text{Eu-O}(1)$. В случае $\text{Eu}^{2+}\text{TiO}_3$ первая КС состояла из 12 одинаковых связей Eu-O с длиной 2.71 Å.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-12-00133).

Список литературы

1. Popov V.V., Menushenkov A.P., et. al. // J. Alloys Compd. 2018. V. 746. P. 377-390.
2. Akamatsu H., Fujita K., Hayashi H., et. al. // Inorg. Chem. 2012. V. 51. P. 4560-4567.

К.Н. БОЛДЫРЕВ¹, А.Д. МОЛЧАНОВА¹, Н.Н. КУЗЬМИН^{1,2}¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ МОНОКРИСТАЛЛА CuB_2O_4

Изучены электронно-колебательные структуры бесфононных линий меди в спектрах поглощения (α , π , σ -поляризации), люминесценции, линейного дихроизма и невязимного поглощения монокристалла метабората меди. Проведена идентификация вибронных полос в оптическом спектре как для меди в позиции $4b$, так и в $8d$, и проведено сравнение с частотами фононов, полученных из расчетов динамики решетки *ab-initio*. Показано, что электронные спектры обусловлены, в первую очередь, электро-дипольными переходами, в то время как магнито-дипольный вклад мал.

K.N. BOLDYREV¹, A.D. MOLCHANOVA¹, N.N. KUZMIN^{1,2}¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*²*Lomonosov Moscow State University*

ELECTRON-VIBRATIONAL SPECTRA OF CuB_2O_4 MONOCRYSTAL

Electron-vibrational structures of zero-phonon lines of copper are studied in absorption (α , π , σ -polarization), luminescence, linear dichroism and non-reciprocal absorption spectra of a single copper metaborate crystal. Vibronic bands in the optical spectrum were identified both for divalent copper at position $4b$ and $8d$, and compared with the frequencies of phonons obtained from *ab-initio* lattice dynamics calculations. It is shown that the electronic spectra are caused, first of all, by the electric dipole transitions, while the magnetic dipole contribution is small.

Метаборат меди занимает особое положение в купратных соединениях. Данный кристалл обладает рядом уникальных свойств, и показывает необычные явления в сравнении с другими кристаллами. Несмотря на довольно простую химическую формулу, CuB_2O_4 имеет достаточно сложную тетрагональную кристаллическую структуру, в которой элементарная ячейка вмещает 6 формульных единиц, имеется две квадратно-координированные и неэквивалентные позиции меди ($4b$ и $8d$ с симметриями S_4 и C_2 соответственно) [1]. Медь в позиции $4b$ ниже 21 К обладает богатой магнитной фазовой диаграммой, с множеством фазовых переходов в координатах температура-магнитное поле [2], в то время как

подсистема $8d$ остается парамагнитной вплоть до самых низких температур (формируются квазиодномерные магнитные цепочки). Кроме того, в данном соединении наблюдается ряд необычных оптических свойств, таких как: необычный для двухвалентной меди оптический спектр, в котором наблюдаются узкие бесфононные линии как от меди в позиции $4b$, так и $8d$ [3]; наведенная внешним магнитным полем генерация второй гармоники; линейный дихроизм в изотропной плоскости кристалла (ab) [4]; значительное изменение коэффициента поглощения первой линии $4b$ при изменении полюсов приложенного внешнего магнитного поля (т.н. невзаимное поглощение, которое также проявляется и в спектрах люминесценции) [5] и другие. С учетом того, что при незначительном замещении атомов меди на никель (менее 1 %) проявляются магнитоэлектрические свойства [6], что часто связано с электронно-колебательным взаимодействием, а также богатый вибронный спектр, который также показывает ряд интересных магнитных и оптических свойств (таких как дихроизм и невзаимность), представляет особый интерес исследование электрон-фононного взаимодействия в этом соединении.

В настоящей работе было проведено исследование электронно-колебательных спутников бесфононных линий меди в позициях $4b$ и $8d$. Проведены исследования в поляризациях α ($\mathbf{k}||c$), π ($\mathbf{k}\perp c$, $\mathbf{E}||c$) и σ ($\mathbf{k}\perp c$, $\mathbf{E}\perp c$), которые показали наибольший вклад электродипольных переходов в оптический спектр. Изучены спектры люминесценции, дихроизма и невзаимного поглощения в области электронно-колебательных полос. Проведено сравнение с первопринципными расчетами, выполненными в работе [7], которое позволило идентифицировать колебания, отвечающие за различные вибронные полосы, и соотнести их тип. Также проведено исследование температурной динамики колебательных спектров, которые показали достаточно слабую зависимость фононного спектра от температуры/магнитного упорядочения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-32-20142 мол_а_вед.

Список литературы

1. Martinez-Ripoll M., Martinez-Carrera S., et al. // Acta Crystallogr. B. 1971. V. 27. P. 677.
2. Petrova A.E., Pankrats A.I. // JETP. 2018. V. 126(4). P. 506.
3. Pisarev R.V., 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. Toyoda S., Abe N., Kimura S., et. al // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 267207.
6. Khanh N.D., Abe N., Kubo K., et. al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 184416.
7. Pisarev R.V., Boldyrev K.N., Popova M.N., et. al. // Phys. Rev. B. 2103. V. 88. P. 024301.

А.В. КНЯЗЬКОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ
ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ И НАПРЯЖЕННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПО ОТРАЖЕНИЮ
ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА**

Приведены результаты определения ориентации оптической оси одноосных кристаллов по величине разности коэффициентов отражения ортогонально линейно поляризованных световых волн. На примере оптического кальцита показана применимость отражательного метода для определения ориентации оптической оси. Приведены результаты определения ориентации оптической оси кристалла NBT с низким значением двулучепреломления.

A.V. KNIAZKOV

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**DETERMINATION OF THE ORIENTATION OF THE OPTICAL
AXIS OF THE UNIAXIAL CRYSTALS AND STRESSED
MATERIALS BY REFLECT POLARIZED LIGHT**

Presents the results of determining the orientation of the optical axis of uniaxial crystals by the difference in the reflection coefficients of orthogonally linearly polarized light. The example of optical calcite shows the applicability of the reflective method for determining the orientation of the optical axis. The results of determining the orientation of the optical axis of a NBT crystal with a low birefringence value are presented.

Одноосные кристаллы используются для изготовления фазовых пластин [1] и электрооптических устройств [2]. Хорошо известно, что механическая нагрузка создает механические напряжения, и изотропный материал становится оптически анизотропным с двулучепреломлением. Оптические свойства деформированного тела соответствуют свойствам одноосного кристалла. Поляризационные свето-пропускающие методы чаще всего используются для исследования прозрачных кристаллов [3, 4] и прозрачной напряженной среды [5]. Недавно предложен отражательный метод для оценки электрооптических коэффициентов материалов [6] по разности коэффициентов отражения R ортогонально линейно поляризованных световых волн и для оценки механических напряжений по измерению индуцированного напряжением двулучепреломления [7].

Целью работы является использование этой идеи для разработки отражательного метода определения ориентации оптической оси. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Полупроводниковый лазер поворачивался вокруг оси на угол $\alpha + \beta$ изменяя, ориентацию начальной поляризации $\alpha + \beta$ ($\beta = 0$) на ортогональную $\alpha + \beta$ ($\beta = \pi/2$).

Измерения отраженной от образца интенсивности света для каждого угла поворота α давали взаимно дополнительные зависимости для ($\beta = 0$) и ($\beta = \pi/2$). Ориентация оптической оси определяется по пересечениям этих кривых. На рис. 2 показаны типичные угловые зависимости для кристалла $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$ (NBT).

Таким образом, продемонстрирован отражательный поляризационный метод определения ориентации оптической оси. Метод прост в реализации, основан на использовании типовых оптических элементов и моторизованных оптомеханических устройств. Следует отметить, что этот метод работает как для прозрачных, так и для непрозрачных материалов.

Данная работа выполнена в рамках проекта № 11.5861.2017/БЧ приказа правительства Министерства образования и науки РФ.

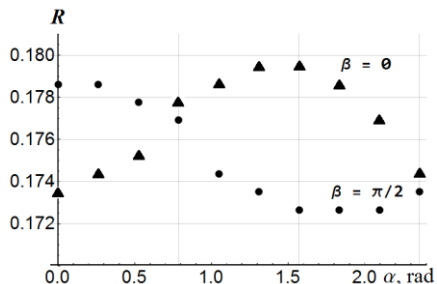
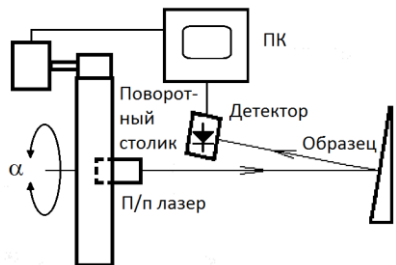


Рис. 1. Экспериментальная установка

Рис. 2. Угловые зависимости отражения

Список литературы

1. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
2. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987.
3. Шубников А.В. Основы оптической кристаллографии. М.: АН СССР, 1958.
4. Четвериков С.Д. Методика кристаллооптического исследования шлифов. М.: Госгеол., 1949.
5. Frucht M.M. Photoelasticity. New York: Wiley, 1941. V. 1.
6. Kniazkov A.V. // Appl. Phys. B. 2015. V. 118. P. 231.
7. Князьков А.В. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 2. С. 346-348.

А.С. ПЕРИН

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО СВЕТЛОГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО СОЛИТОНА В ОБЪЕМЕ
НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Экспериментально продемонстрирована компенсация нелинейной дифракции одномерного лазерного пучка в кристаллическом образце ниобата лития на длине волны излучения 532 нм в условиях обращения знака нелинейно-оптического отклика материала при вкладе пирoeлектрического эффекта. Продemonстрировано расщепление планарного светового пучка в режиме светлого пространственного солитона на двумерные филаменты, связанное с эффектом пространственной модуляционной неустойчивости.

A.S. PERIN

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**GENERATION OF 1D BRIGHT SPATIAL SOLITON IN A BULK
OF LITHIUM NIOBATE DUE PYROELECTRIC EFFECT**

Compensation of nonlinear diffraction of one-dimensional laser beam in lithium niobate crystal at wavelength of 532 nm has been experimentally demonstrated in conditions of the material nonlinear response sign change due to the pyroelectric effect contribution. Splitting of the planar and phased planar light beams into some two-dimensional filaments due to the spatial modulation instability effect has been also demonstrated.

Распространение узких монохроматических световых пучков в режиме светлых пространственных оптических солитонов, сформированных за счет компенсации их естественной дифракционной расходимости пирoeлектрическим эффектом при изменении температуры образцов LiNbO_3 , является одним из способов формирования оптических волноводных структур в сегнетоэлектриках [1, 2]. Наряду с формированием и изучением особенностей характеристик двумерных волноводных элементов [2], представляет интерес и возможность оптического формирования в LiNbO_3 с обращенным знаком нелинейного отклика, планарных волноводов в режиме одномерных пространственных светлых оптических солитонов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование возможности формирования планарных волноводных структур в кристаллическом образце LiNbO_3 при вкладе пьезоэлектрического эффекта в нелинейный отклик.

В экспериментах использовался номинально чистый образец LiNbO_3 с размерами $10 \times 4 \times 4$ мм³ вдоль осей X , Y , Z . Кристалл экспонировался излучением твердотельного лазера YAG:Nd^{3+} с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм, а размеры светового пятна по уровню половинной интенсивности на входной плоскости образца составляли ~ 22 мкм вдоль оптической оси кристалла (ось Z) и $\sim 1,1$ мм вдоль оси Y . Свет распространяется вдоль оси X кристалла, картины световых полей представлены на рис. 1.

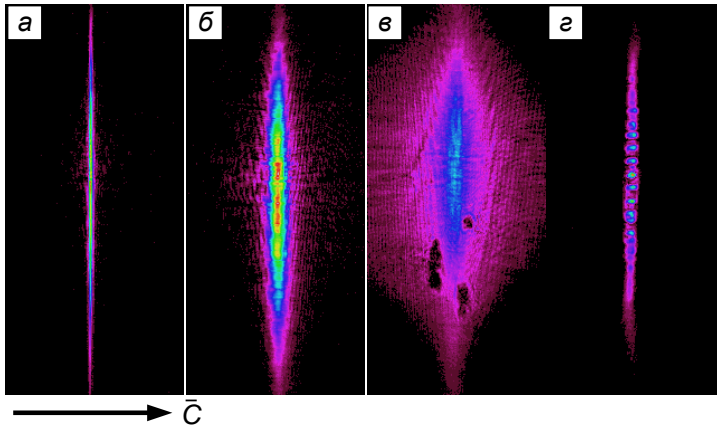


Рис. 1. Картины световых полей: на входной плоскости кристаллического образца (а); на выходной плоскости образца в линейном режиме (б); на выходной плоскости образца при фоторефрактивной дефокусировке пучка (в); на выходной плоскости образца в условиях вклада пьезоэлектрического эффекта в нелинейный отклик и развитии модуляционной неустойчивости (г)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект 3.1110.2017/ПЧ), РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018.

Список литературы

1. Popescu S.T., Petris A., et. al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 213110.
2. Perin A.S., Shandarov V.M., et. al. // Phys. of Wave Phenom. 2016. V. 24(1). P. 7.

Н.Н. ПРОКОПИВ, А.В. СЮЙ, В.В. СУРИЦ
Дальневосточный университет путей сообщения, Хабаровск

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ

В данной работе рассмотрена автоматизированная установка для определения электрооптических коэффициентов кристаллов ниобата лития, основанная на интерференционно-поляризационном методе. В установку входит оптическая, программная и аппаратная часть.

N.N. PROKOPIV, A.V. SYUY, V.V. SURITZ
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

AUTOMATED INSTALLATION FOR DETERMINATION OF ELECTROOPTIC COEFFICIENTS OF LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

In this paper, we consider an automated setup for determining the electro-optical coefficients of lithium niobate crystals based on the interference-polarization method. The installation includes optical, software and hardware.

Благодаря уникальному комплексу физических свойств кристаллы ниобата лития LiNbO_3 уже длительное время являются объектом интенсивного изучения. Это обусловлено тем, что кристаллы ниобата лития могут использоваться в устройствах оптической памяти, узкополосных фильтрах телекоммуникационных систем, акустооптике, нелинейной оптике и пр. [1, 2]. Кристаллы ниобата лития обладают целым рядом ярких физических свойств, в том числе электрооптическими свойствами. Эти свойства обусловлены высокими значениями электрооптических коэффициентов [3].

Целью работы является автоматизация процесса определения электрооптических коэффициентов кристаллов ниобата лития. В качестве базовой установки для проведения эксперимента была использована схема, основанная на интерференционно-поляризационном методе, приведённая на рис. 1. В стандартную схему внесены элементы 3 и 6 которые позволяют получать равномерно смазанное изображение интерференционных полос коноскопической картины. Создана программа позволяющая методами распознавания оптических образов определить по

изображению положение и интенсивность интерференционных полос, тем самым определять оптические коэффициенты автоматически [4, 5]. Также для установки был модифицирован источник постоянного высоковольтного напряжения. Источник сопряжен через схему ЦАП с основной программой, чем достигается автоматическое управление прикладываемого напряжения. Таким образом созданный программно-аппаратный комплекс позволяет выявить электрооптические коэффициенты для кристаллов ниобата лития в автоматическом режиме.

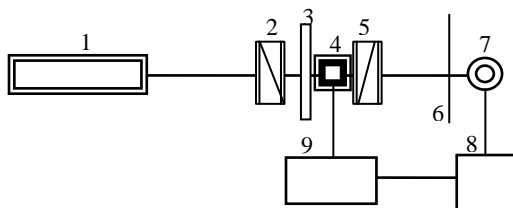


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 - гелий-неоновый лазер ГН-5 с длиной волны 632,8 нм; 2 - поляризатор;
 3 - вращающийся рассеиватель; 4 - анализатор; 5 - кристалл,
 6 - полупрозрачный рассеивающий экран, 7 - веб-камера,
 8 - компьютер, 9 - источник высоковольтного напряжения

Список литературы

- Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
- Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975.
- Günter P., Huignard J.-P. Photorefractive Materials and Their Applications 2 Basic effects. NY.: Springer Science + Business Media, LLC, 2007.
- Определение электрооптических коэффициентов кристаллов класса 3m коноскопическим методом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614869. Дата поступления 28.12.2017. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.04.2018.
- Прокопив Н.Н., Суриц В.В., Киле Е.О., Сюй А.В., Криштоп В.В. Программа ЭВМ для определения электрооптических коэффициентов кристаллов класса 3m коноскопическим методом // Сборник трудов X Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2017». Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017. С. 493-495.

В.А. МАКСИМЕНКО

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

**СПЕКЛ-СТРУКТУРА КАРТИНЫ
ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА
В КРИСТАЛЛЕ $\text{LiNbO}_3\text{:Rh}$**

В работе приводятся результаты экспериментального исследования картины фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития, легированных родием. Обсуждаются выявленные закономерности пространственного распределения интенсивности рассеянного излучения.

V.A. MAKSIMENKO

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

**SPECKLE IN THE PATTERN OF THE PHOTOINDUCED
LIGHT SCATTERING IN $\text{LiNbO}_3\text{:Rh}$ CRYSTAL**

The experimental investigation of the photoinduced light scattering pattern in lithium niobate crystals doped rhodium are given in the paper. The revealed regularities of the scattered light spatial distribution are discussed.

Возникновение фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) в кристаллах ниобата лития обусловлено взаимодействием лазерного излучения с фоторефрактивной средой [1].

Известно, что картина ФИРС, наблюдаемая на экране, обладает зернистостью [1], что роднит ее со спеклами, возникающими при прохождении когерентного излучения через случайно-неоднородные среды. Анализ спекл-подобных структур в картине ФИРС позволяет делать заключения о природе светорассеивающих центров в кристаллах ниобата лития [2].

В работе был проведен эксперимент по регистрации спекл-подобных структур в картине ФИРС, возникающего в кристаллах ниобата лития, легированных родием. Для того чтобы в картине ФИРС были четко различимы возникающие спеклы, наблюдение проводилось в дальней зоне. С этой целью экран для наблюдений устанавливался на расстоянии 10 метров от облучаемого образца.

Для эксперимента была выбрана кристаллическая пластинка $\text{LiNbO}_3\text{:Rh}$ x -среза. Излучение He-Ne лазера (длина волны 0,6328 мкм, мощность 60 мВт) было плоско поляризовано и фокусировалось в

кристалл линзой с фокусным расстоянием 110 мм. Оптическая ось кристалла лежала в плоскости поляризации лазерного пучка.

На рис. 1а представлено изображение светового пятна на экране от лазерного пучка, прошедшего кристалл в начальный момент времени. Видно, что кроме мелких спеклов, обусловленных шероховатостью экрана, никаких особенностей в пятне нет. Его размер – порядка 10 см. Однако, по мере развития ФИРС, как в центральном пятне, так и в областях картины ФИРС за его пределами возникают значительные изменения, проявляется особая структура, которая представлена на рис. 1б.

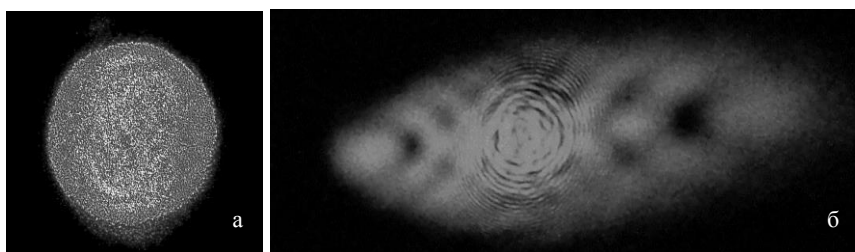


Рис. 1. Поперечное сечение лазерного пучка, прошедшего кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$; в начальный момент времени (а); после выхода ФИРС на стационарный уровень (б); масштаб фотографий различен

Можно заметить, что в самом центре располагаются относительно крупные (размером порядка 1 см) спеклы и их расположение хаотично. Эта область окружена слоями азимутально-ориентированных спеклов, размеры которых в среднем в несколько раз меньше, чем у тех, что в центре. Общий размер центральной области составляет 13-14 см.

Область, окружающая центральное пятно, хорошо структурирована, что может указывать на процессы самоорганизации в системе лазерное излучение – фоторефрактивная среда [2]. Изучение закономерности формирования картины ФИРС может дать дополнительную информацию о подобных процессах в фоторефрактивных материалах.

Список литературы

1. Максименко В.А., Стой А.В., Карпец Ю.М. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. М.: Физматлит, 2008.
2. Сидоров Н.В., Мануковская Д.В., Палатников М.Н. Фрактальный анализ картин фотоиндуцированного рассеяния света в стехиометрических кристаллах ниобата лития // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 6. С. 108-117.

М.Г. КИСТЕНЕВА, Е.С. СИМ, С.М. ШАНДАРОВ,
Р.В. МЕЗЕНЦЕВ, Ю.Ф. КАРГИН¹

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

ДИНАМИКА ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cd}$

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений в оптическом поглощении в кристалле $\text{BiTiO}_{20}:\text{Cd}$, индуцированных циркулярно-поляризованным лазерным излучением с длинами волн 655 и 532 нм.

M.G. KISTENEVA, E.S. SIM, S.M. SHANDAROV,
R. V. MEZENSEV, Yu.F. KARGIN¹

*Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
¹Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow*

DYNAMICS OF PHOTOINDUCED ABSORPTION OF LIGHT IN $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cd}$ CRYSTAL

We experimentally studied the changes in optical absorption induced by circularly-polarized laser radiation with the wavelengths of 655 and 532 nm in a $\text{BiTiO}_{20}:\text{Cd}$ crystal.

В кристаллах силленитов проявление кругового дихроизма возможно вблизи полосы поглощения с максимумом при 2,9 эВ, обусловленной наличием собственных структурных дефектов [1]. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований динамики фотоиндуцированного поглощения в принадлежащем к классу силленитов кристалле $\text{BiTiO}_{20}:\text{Cd}$ (ВТО:Сd), для лазерного излучения с правой и левой циркулярной поляризацией, на длинах волн 655 и 532 нм.

Эксперименты, в которых использовался кристалл ВТО:Сd среза (100) с толщиной 1,5 мм, проводились по методике, описанной в [2]. Для лазерного излучения с длиной волны 532 нм его интенсивность на входной грани кристалла составляла около 130 и 200 мВт/см² при правом и левом типе циркулярной поляризации, соответственно. В экспериментах измерялось оптическое поглощение, наведенное как для света с длиной волны 532 нм, так и для зондирующего лазерного пучка с длиной волны 655 нм, интенсивность которого на входной грани кристалла составляла около 50 мВт/см². Получено, что излучение с длиной волны 532 нм

вызывает рост поглощения на ней в кристалле ВТО:Сd для обеих типов поляризации. Временная зависимость изменений в показателе поглощения, представленная на рис. 1, удовлетворительно описывается суммой трех экспонент вида

$$\Delta k(t) = \Delta k^{st} \left[1 - a_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - a_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - (1 - a_1 - a_2) \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \right],$$

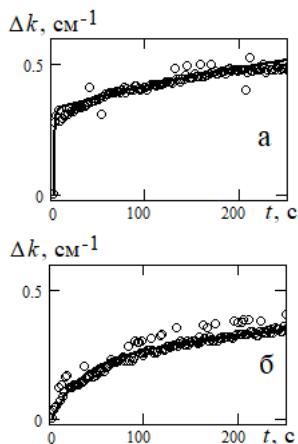


Рис. 1. Динамика изменения показателя поглощения света в кристалле ВТО:Сd на длине волны 532 нм при левой (а) и правой (б) циркулярной поляризации, кружки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости

со значением $\Delta k^{st} = 0,93 \text{ см}^{-1}$ и постоянными времени $\tau_1 = 0,9 \text{ с}$, $\tau_2 = 250,7 \text{ с}$ и $\tau_3 = 4790 \text{ с}$ для левой циркулярной поляризации. При правой поляризации эти величины составили $\Delta k^{st} = 0,54 \text{ см}^{-1}$, $\tau_1 = 16,9 \text{ с}$, $\tau_2 = 208,3 \text{ с}$, $\tau_3 = 2560 \text{ с}$. Анализ результатов показывает, что изменение оптического поглощения при воздействии на кристалл ВТО:Сd света с левой циркулярной поляризацией происходит заметно быстрее, по сравнению с наблюдаемым при её правом характере. Воздействие на кристалл ВТО:Сd излучения с длиной волны 655 нм приводит к его просветлению. Нами не было обнаружено отличий в динамике изменения показателя поглощения кристалла на длине волны 655 нм при воздействии излучением с длиной волны 532 нм, имеющем правую и левую круговую поляризацию.

Таким образом, изменения оптического поглощения света в кристалле ВТО:Сd на длине волны 532 нм при левой циркулярной поляризации характеризуются большей скоростью роста на начальном участке засветки кристалла, по сравнению с их изменениями при правой поляризации.

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

Список литературы

1. Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марьин А.А., Егорышева А.В. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20+8}$. Синтез, строение, свойства, Москва. 2004.
2. Худякова Е.С., Кистенева М.Г. и др.// Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57 (8-9). С. 660.

Е.А. МАМОНОВ, А.В. РАСПУТНЫЙ, Д.А. КОПЫЛОВ,
Т.В. МУРЗИНА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЯРКОГО СЖАТОГО
ВАКУУМА В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приведены результаты численного моделирования частотных спектров и эффективности генерации вынужденного параметрического рассеяния, т.е. яркого сжатого вакуума, при использовании излучения фемтосекундной длительности для разных нелинейных кристаллов (ВВО, LiNbO₃, LBO, KTP).

E.A. MAMONOV, A.V. RASPUTNYI, D.A. KOPYLOV,
T.V. MURZINA

Lomonosov Moscow State University

**STUDY OF BRIGHT SQUEEZED VACUUM GENERATION
IN NONLINEAR CRYSTALS UNDER INTENSE
FEMTOSECOND RADIATION**

We present the results of numerical study of frequency spectra and efficiency of bright squeezed vacuum generated by high gain parametric down conversion with femtosecond radiation in different nonlinear crystals (BBO, LiNbO₃, LBO, KTP).

Спонтанное параметрическое рассеяние света (СПР) – нелинейно-оптический процесс, при котором в кристалле с квадратичной нелинейной восприимчивостью происходит распад одного фотона накачки и рождение двух других фотонов: сигнального и холостого [1]. Такой процесс возможен при выполнении законов сохранения энергии и импульса. Вследствие того, что фотоны рождаются парами, между ними существует однозначная корреляция, и свет, получаемый в процессе СПР, является двухфотонным. Как следствие, для такого света не существует классических аналогов.

Для генерации СПР используют нелинейные кристаллы с большой квадратичной восприимчивостью (например ВВО, LiNbO₃, KTP), причем волна накачки, сигнальная и холостые волны должны удовлетворять условию фазового синхронизма.

При достаточно сильной накачке возможен процесс параметрического усиления излучения СПР. В итоге число фотонов в каждой моде излучения будет увеличиваться экспоненциально. Такой процесс называется вынужденным параметрическим рассеянием (ВПР) [1] и итоговое состояние света является ярким сжатым вакуумом [2]. Вследствие своих уникальных статистических и спектральных свойств, яркий сжатый вакуум представляет интерес для задач квантовой электроники, в частности для нелинейной и корреляционной спектроскопии [3].

Для увеличения эффективности генерации излучения ВПР используются импульсные лазеры. Таким образом, в общем случае волна накачки, сигнальная и холостая волны за счет частотной дисперсии распространяются в среде с разными групповыми скоростями, в том числе происходит дисперсионное расплывание, что ограничивает эффективность генерации яркого сжатого вакуума при использовании накачки фемтосекундной длительности. Для оптимальной генерации ВПР необходим выбор определенного кристалла фиксированной длины.

В данной работе представлены результаты численного моделирования генерации яркого сжатого вакуума с использованием формализма мод Шмидта [4, 5], при использовании в качестве накачки излучения второй гармоники иттербиевого лазера (длина волны 525 нм, длительность импульса 200 фс). В работе проведен сравнительный анализ частотных спектров ВПР и эффективности генерации для кристаллов ВВО, LiNbO₃, LBO и KTP. Определены оптимальные условия для генерации яркого сжатого вакуума.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-32-00710.

Список литературы

1. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980.
2. Chekhova M.V., Leuchs G., Żukowski M. // Optics Communications. 2015. V. 337.
3. Dorfman K.E., Schlawin F., Mukamel S. // Reviews of Modern Physics. 2016. V. 88(4).
4. Lemieux S., et al. // Physical Review Letters. 2016. V. 117(18).
5. Peřina J. // Physical Review A. 2015. V. 92(1).

И.В. БУДКИН^{1,2}, С.А. КЛИМИН¹, Д.В. БАДИКОВ³,
В.В. БАДИКОВ³

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

³*Кубанский государственный университет, Краснодар*

ИК АКТИВНЫЕ ФОНОНЫ НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА BaGa₂GeSe₆

Впервые исследованы инфракрасные спектры отражения нелинейного кристалла BaGa₂GeSe₆. Получены оптические параметры для ИК активных колебаний. Фононный спектр данного кристалла короче, чем спектр родственного кристалла BaGa₂GeS₆, что важно для практических применений в ИК-области спектра.

I.V. BUDKIN^{1,2}, S.A. KLIMIN¹, D.V. BADIKOV³, V.V. BADIKOV³

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

³*Kuban State University, Krasnodar*

IR-ACTIVE PHONONS OF BaGa₂GeSe₆ NONLINEAR CRYSTAL

First study of IR reflection of the BaGa₂GeSe₆ nonlinear crystal is presented. Optical parameters of IR-active phonons are obtained. Phonon spectrum of the crystal under study is shorter than that of the parent BaGa₂GeS₆ crystal, which is important for applications.

Создание эффективных лазерных источников света в инфракрасной (ИК) области спектра требует наличия новых нелинейных материалов, работающих в этой области [1]. Кристаллы BaGa₂GeS₆ и BaGa₂GeSe₆, синтезированные совсем недавно, обладают прекрасными нелинейными характеристиками [2, 3], сравнимыми с коммерческими кристаллами, в то же время, они более стабильны химически и, таким образом, являются перспективными для спектроскопических применений в ИК-области спектра [3, 4]. Разупорядочение в галлий-германиевой подрешетке приводит к усложнению колебательного спектра [5]. В данной работе впервые представлены результаты экспериментального исследования ИК фононного спектра кристалла BaGa₂GeSe₆.

Рост монокристаллов осуществлялся методом Бриджмена-Стокбаргера. Пространственная кристаллографическая группа R3 была подтверждена рентгеновскими методами. Спектры ИК-отражения были зарегистрированы на фурье-спектрометре BRUKER IFS66.

Полученные в эксперименте спектры приведены на рис. 1. Для определения параметров оптических фононов был применен дисперсионный анализ. Получены следующие частоты (в см^{-1}) ИК-фононов: 56.4, 72, 85, 119.4, 131, 231, 252, 275, 296 (А-моды) и 51.9, 84.4, 111.3, 123.3, 237.7, 252.4, 263.2, 294 (Е-моды). Найденные в данной работе оптические параметры являются экспериментальной базой данных для дальнейшего проведения расчетов фононных свойств кристалла.

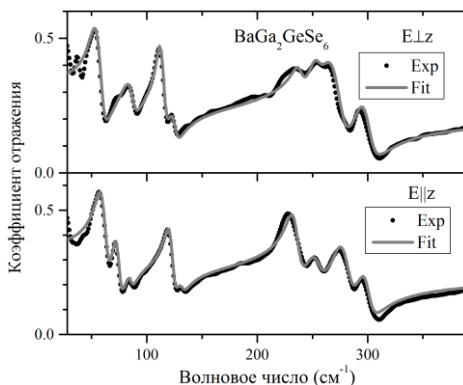


Рис. 1. Спектры ИК-отражения кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ в поляризованном свете, $T = 300 \text{ K}$, серые кривые – результат моделирования спектров отражения

Отметим, что колебательные частоты родственного кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ не превышают 300 см^{-1} , в то время как для $\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$ этот предел составляет 400 см^{-1} [5]. Данный факт обусловлен тем, что входящий в состав $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ селен, тяжелее серы (79 против 32 атомных единиц массы, соответственно).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-32-00588).

Список литературы

1. Petrov V. // Prog. Quantum Electron. 2015. V. 42. P. 1-106.
2. Badikov V.V., Badikov D.V., et. al. // Optical Materials Express. 2016, V. 6. P. 2933-2938.
3. Lin X., Guo Y., et. al. // J. Solid State Chemistry. 2012, V. 172. P. 172-177.
4. Ионин А.А., Киняевский И.О. и др. // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 312-313.
5. Будкин И.В., Маврин Б.Н. и др. // Материалы XXIII Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2017. С. 341-344.

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

**ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ
ДО ~ 20 мкм ПУТЕМ СМЕШЕНИЯ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ
ЩЕЛЕВЫХ СО- И СО₂-ЛАЗЕРОВ
В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ PbIn₆Te₁₀**

Разработана гибридная лазерная система на базе щелевых СО- и СО₂-лазеров с синхронной модуляцией добротности резонатора общим вращающимся зеркалом и преобразованием частоты излучения в нелинейном кристалле. Получена генерация более дюжины спектральных линий излучения разностной частоты СО- и СО₂-лазеров в кристалле PbIn₆Te₁₀ в интервале длин волн от ~ 14 до ~ 20 мкм.

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

**LIGHT EMISSION WITH WAVELENGTH UP TO ~ 20 μm
BY FREQUENCY MIXING OF SLAB CO- AND CO₂-LASERS
RADIATION IN PbIn₆Te₁₀ CRYSTAL**

A hybrid laser system based on slab CO- and CO₂-lasers with synchronous Q-switching by a joint rotating mirror and frequency conversion of the radiation in a nonlinear crystal was developed. More than a dozen emission lines within wavelength range from ~ 14 to ~ 20 μm were obtained by means of difference frequency generation of the CO and CO₂ lasers radiation in a PbIn₆Te₁₀ crystal.

Для дистанционного газового анализа и лидарного зондирования, требуются источники лазерного излучения, работающие в инфракрасных окнах прозрачности атмосферы [1]. В Лаборатории газовых лазеров ФИАН разработана простая лазерная система, состоящая из компактных щелевых СО- и СО₂-лазеров с синхронной модуляцией добротности резонатора общим вращающимся зеркалом и преобразованием частоты излучения в нелинейных кристаллах. Длительность импульсов излучения лазеров составляла ~ 1 мкс.

СО-лазер работал в неселективном режиме и излучал ~ 100 линий в интервале длин от 4.9 до 6.8 мкм и частично охватывал первое окно прозрачности атмосферы (3-5 мкм). Пиковая мощность излучения, интегральная по спектру, составляла ~ 4 кВт. СО₂-лазер работал одновременно на 4 переходах девятимикронной полосы: Р(20), Р(22), R(20), R(22). Около 90 % общей пиковой мощности излучения (~ 100 Вт) приходилось на линии Р(20) ($\lambda = 9.55$ мкм) и R(20) ($\lambda = 9.27$ мкм). Излучение СО₂-лазера попадает во второе окно прозрачности атмосфера (8-12 мкм).

Для освоения третьего окна прозрачности атмосферы (16-24 мкм) осуществлена генерация излучения на разностной частоте СО- и СО₂-лазеров в нелинейном кристалле PbIn₆Te₁₀. Временное согласование импульсов достигалось за счёт синхронной модуляции добротности вращающимся зеркалом. Пространственное сложение импульсов осуществлялось поляризатором, так как СО- и СО₂-лазеры имели скрещенные поляризации. Излучение фокусировалось в кристалл сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 15 см.

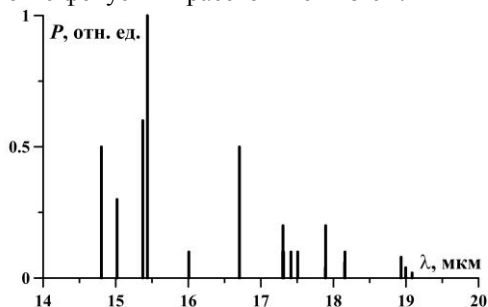


Рис. 1. Спектр излучения разностных частот СО- и СО₂-лазеров, полученный в кристалле PbIn₆Te₁₀

В спектре излучения разностных частот, вышедшего из кристалла, было зарегистрировано более дюжины линий в интервале длин волн от 14.5 до 19.1 мкм (рис. 1). Таким образом, продемонстрирована возможность генерации излучения в третьем окне прозрачности атмосферы путем смешения излучения СО- и СО₂-лазеров в нелинейном кристалле с рекордной для данной методики длиной волны 19.1 мкм.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10619).

Список литературы

1. Budilova O.V., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., et. al. // Opt. Comm. 2016. V. 363, P. 26.

К.А. ЗОЛИНА¹, А.И. ГАРИФУЛЛИН¹, Р.Х. ГАЙНУТДИНОВ^{1,2},
М.А. ХАМАДЕЕВ^{1,2}

¹*Казанский федеральный университет*

²*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА С УЛЬТРАВЫСОКИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Для практических приложений и теоретического исследования квантовоэлектродинамических эффектов в среде фотонных кристаллах необходимо знание дисперсионных соотношений, так как пространственно-периодическое изменение показателя преломления материала оказывает существенное влияние на волновые функции фотонов. В данной работе рассматривается одномерный фотонный кристалл на основе метаматериала с ультравысоким показателем преломления. Приведен вывод трансцендентного уравнения, связывающего частоту фотона с волновым вектором, построены дисперсионные соотношения в одномерном фотонном кристалле для случая ТЕ- и ТМ-поляризации методом матриц распространения.

К.А. ZOLINA¹, А.И. GARIFULLIN¹, R.Kh. GAINUTDINOV^{1,2},
M.A. KHAMADEEV^{1,2}

¹*Kazan Federal University*

²*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

INVESTIGATION OF THE BAND STRUCTURE OF PHOTONIC CRYSTAL BASED ON METAMATERIAL WITH ULTRAHIGH REFRACTIVE INDEX

For practical applications and theoretical investigation of quantum-electrodynamic effects in photonic crystal medium the definition of the dispersion relations are necessary because the spatial-periodic change of the refractive index of the material has a significant effect on the wave functions of photons. In this paper, one-dimensional photonic crystal based on metamaterial with an ultrahigh refractive index is considered. The derivation of the transcendental equation relating the photon's frequency with the wave vector is given, the dispersion relations in the one-dimensional photonic crystal are constructed for the case of TE- and TM-polarization using the transfer-matrix method.

Фотонные кристаллы (ФК) имеют периодическую диэлектрическую структуру с фотонными запрещенными зонами [1]. Наличие фотонных запрещенных зон предоставляет возможность для широкого применения ФК в науке и технике [2].

Целью работы является исследование зонной структуры одномерного ФК, состоящего из слоев метаматериала с ультравысоким показателем преломления и вакуума. Для построения дисперсионных соотношений мы используем метод матриц распространения [3]. Электромагнитное поле разделяется на две линейно независимые величины – компоненты электрического и магнитного полей, ТЕ (поперечно электрическая) и ТМ (поперечно магнитная) моды соответственно, и значения этих величин в двух разных точках слоистой структуры связаны матрицей распространения.

В рамках данной работы в качестве одномерного фотонного кристалла рассматривается кристалл на основе метаматериала, состоящего из наночастиц золота, покрытых диэлектрической матрицей из полиметилметакрилата (РММА) [4]. При толщине вакуумного слоя $a_l = 250$ нм и метаматериала $a_h = 500$ нм, $n_l = 1$ – коэффициент преломления 1 слоя, $n_h = 3,75$ – коэффициент преломления 2 слоя (рис. 1).

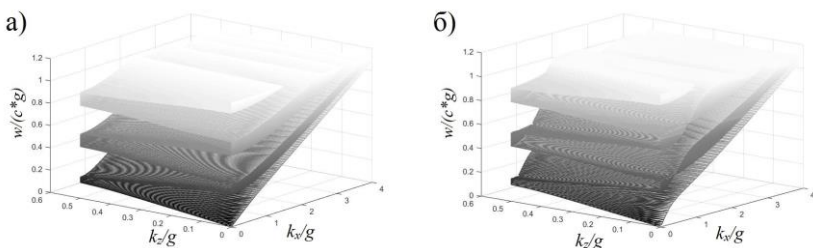


Рис. 1. Графики дисперсионных соотношений для метаматериала: в случае ТЕ-поляризации (а), в случае ТМ-поляризации (б) при условиях: толщина слоя вакуума $a_l = 250$ нм и метаматериала $a_h = 500$ нм, $n_l = 1$ – коэффициент преломления вакуумного слоя, $n_h = 3,75$ – коэффициент преломления слоя метаматериала

Список литературы

1. Дегтяренко Н.Н., Каргин Н.И.// МИФИ. 2012. С. 62.
2. Ho K.M., Chan C.T., Soukoulis C.M. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 65. P. 3152-3155.
3. Skorobogatiy M., Yang Y.J. // Cambridge University Press. 2009. P. 72.
4. Kim J.Y., et. al. // Nat. Commun. 2016. P. 12911.

И.Р. ПРУДНИКОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИФРАКЦИЯ РАЗЛИЧНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ВОЛН В 1-D ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С ВНЕДРЕННЫМИ УЛЬТРАТОНКИМИ СЛОЯМИ

Проведено аналитическое исследование дифракции световых волн с различными поляризациями в 1-D фотонном кристалле, в который помещены ультратонкие разделительные слои (толщины изменяются в пределах от менее, чем 1 нм до нескольких десятков нанометров). Показано, что условие возбуждения интенсивной локализованной моды электромагнитного поля внутри фотонного кристалла зависит от поляризации падающей волны только в случае определенной толщины разделительного слоя.

I.R. PRUDNIKOV

Lomonosov Moscow State University

DIFFRACTION OF DIFFERENTLY POLARIZED LIGHT WAVES IN A 1-D PHOTONIC CRYSTAL WITH EMBEDDED ULTRATHIN LAYERS

Diffraction of differently polarized light waves in a 1-D photonic crystal with embedded ultra-thin spacer layers (the thicknesses of such layers change from nearly 1 nm to a few tens of nanometers) has been analytically investigated. It is shown that the condition for the excitation of an intensive localized mode of electromagnetic field inside a photonic crystal depends on polarization of an incident light wave only where a spacer layer has a certain thickness.

Известно, что внедрение в периодический 1-D фотонный кристалл (ФК) разделительных/дефектных слоев, приводит к появлению интенсивных/резонансных локализованных мод электромагнитного поля [1]. Интенсивная мода появляется при резонансной длине волны, λ_r , падающего на ФК света и определяет минимум коэффициента зеркального отражения в пределах фотонной запрещенной зоны [1]. В настоящем сообщении показано, что резонансная длина волны λ_r в случае s- и p-поляризаций падающей на ФК плоской монохроматической может быть как одинаковой, так и разной. Это зависит от толщины разделительного слоя. В работе мы рассматриваем 1-D ФК, составленные из изотропных и немагнитных слоев и внедренные в ФК ультратонкие

пленки с толщинами ≥ 1 нм. В настоящее время обсуждаются различные оптические эффекты, которые можно наблюдать при отражении света от многослойных структур, состоящих из ультратонких слоев с субволновыми толщинами [2, 3].

На рис. 1а приведены рассчитанные кривые, показывающие длину волны, λ_r , при которой появляется резонансный минимум коэффициента зеркального отражения от ФК с одной разделительной пленкой. Видно, что при толщине этой пленки, лежащей в диапазоне $0 < l \leq 10$ нм, значение λ_r одинаковое для s- и р-поляризаций. Следовательно, совпадают и положения минимумов для коэффициентов зеркального отражения R. Например, на вставке к рис. 1а приведены коэффициенты R, рассчитанные для $l = 1$ нм. В этом случае длина волны $\lambda_r \approx 743$ нм и соответствует центру запрещенной зоны. При увеличении l длина волны λ_r становится различной для двух поляризаций. Если $l = 40$ нм, то разница $\Delta\lambda_r$ достигает 5 нм вблизи границы фотонной запрещенной зоны (см. рис. 1а). На рис. 1б показаны коэффициенты R для случая $l = 25$ нм. Из рис. 1б видно, что $\Delta\lambda_r \approx 3$ нм. Это значение больше полуширин соответствующих минимумов (см. рис. 1б). Обсуждаемые особенности связаны с динамической дифракцией света в ФК [4]. Численные расчеты выполнены для ФК, составленных из бислоев ZnS/SrF₂.

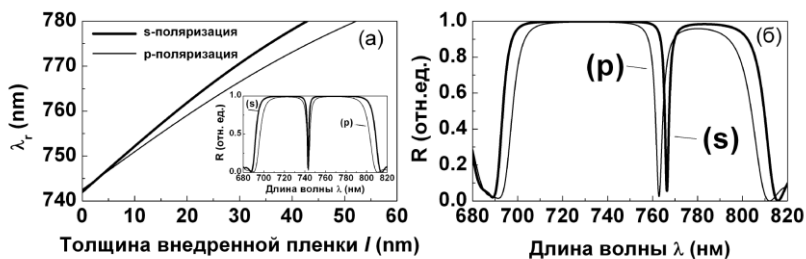


Рис. 1. Резонансная длина волны, λ_r , в зависимости от толщины внедренной пленки l в случае s- и р-поляризации падающей на ФК волны, угол падения $\vartheta = 30^\circ$; на вставке показаны коэффициенты зеркального отражения R, для ФК при $l = 1$ нм и $\vartheta = 30^\circ$ (а); коэффициенты зеркального отражения R, при $l = 25$ нм и $\vartheta = 30^\circ$ (б)

Список литературы

1. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. Photonic crystals: molding the flow of light, second ed. Princeton: Princeton University Press, 2008.
2. Herzig Sheinfux H., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 243901.
3. Herzig Sheinfux H., et. al. // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 12927.
4. Prudnikov I.R. // Physica B. 2016. V. 481. P. 172.

К.А. АНДРЕЕВА¹, Р.И. БИКМУХАМЕТОВ¹, А.И. ГАРИФУЛЛИН¹,
Р.Х. ГАЙНУТДИНОВ^{1,2}, М.А. ХАМАДЕЕВ^{1,2}

¹*Казанский федеральный университет*

²*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ С УЛЬТРАВЫСОКИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Методом матриц распространения построена теоретическая модель описания оптических свойств одномерных фотонных кристаллов. Путем численного моделирования получены и проанализированы спектры ФК на основе метаматериала при различных параметрах кристалла.

К.А. ANDREEVA¹, R.I. BIKMUKHAMEDOV¹, A.I. GARIFULLIN¹,
R.Kh. GAINUTDINOV^{1,2}, M.A. KHAMADEEV^{1,2}

¹*Kazan Federal University*

²*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

TRANSMISSION SPECTRA OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS BASED ON METAMATERIALS WITH ULTRAHIGH REFRACTIVE INDEX

The theoretical description model of optical properties of one-dimensional photonic crystal is constructed by transfer-matrix method. Transmission spectra of photonic crystal based on metamaterials with ultrahigh refractive index are obtained and analyzed at various parameters of crystal.

Фотонные кристаллы (ФК) и метаматериалы проявляют весьма необычные электродинамические свойства [1]. Одним из важных свойств фотонных кристаллов является наличие фотонных запрещенных зон – областей, в которых запрещено распространение электромагнитного излучения с определенной длиной волны, сопоставимой с периодом структуры фотонного кристалла. Наличие таких зон приводит к разрывам и искажениям дисперсионных соотношений в отличие от случая вакуума [2]. Для практических и фундаментальных исследований, например, подавления спонтанной эмиссии [3], наблюдения эффекта изменения массы электрона [4], усиления эффектов квантовой интерференции [5], необходимы фотонные кристаллы с большим оптическим контрастом. В

качестве такой среды можно использовать фотонные кристаллы на основе метаматериалов с ультравысоким показателем преломления [6, 7].

Цель работы – теоретическое построение спектров пропускания одномерных фотонных кристаллов на основе метаматериала, полученного в [6], при разном количестве оптических ячеек и различных углах падения. На рис. 1 при увеличении угла падения света происходит смещение спектра пропускания в коротковолновую область, что связано с увеличением оптического пути в среде ФК. На рис. 2 с увеличением числа оптических ячеек наблюдается увеличение количества новых максимумов, однако в связи с поглощением света метаматериалом на основе золота [6] наблюдается уменьшение коэффициента пропускания. В рассчитанных спектрах прохождения не наблюдаются фотонные запрещенные зоны в связи с малым числом оптических ячеек и наличием поглощения излучения фотонным кристаллом на основе метаматериала.

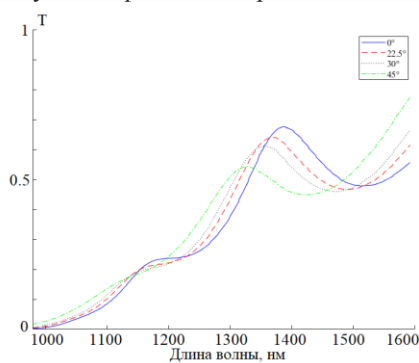


Рис. 1. График зависимости коэффициента пропускания фотонного кристалла из семи оптических ячеек на основе метаматериала [6] от длины волны при различных углах падения, второй слой оптической ячейки – стекло ($n = 1,5$)

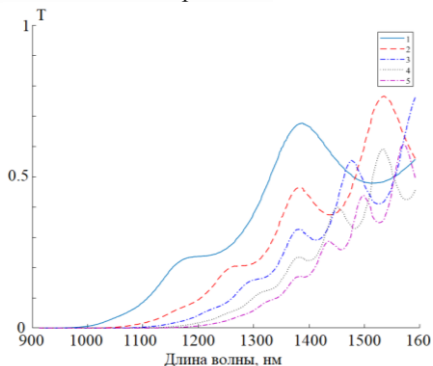


Рис. 2. График зависимости коэффициента пропускания фотонного кристалла на основе метаматериала [6] от длины волны при различном количестве оптических ячеек (7, 14, 21, 28 и 35 соответственно)

Список литературы

1. Yablonovitch E., et. al. // Physical Review Letters. 1991. V. 67. P. 2295-2298.
2. Ohtaka K. // Physical Review B. 1979. V. 19. P. 5057-5067.
3. Quang T., et. al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 5238-5241.
4. Zhu S.-Y., et. al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 205.
5. Gainutdinov R.Kh., et. al. // Phys. Rev. A. 2012. V. 85. P. 053836.
6. Kim R., et. al. // ACS Photonics. 2018. V. 5. P. 1188-1195.
7. Chung K., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109 (2). P. 021114.

Ю.А. СТРОКОВА, С.Е. СВЯХОВСКИЙ, А.М. САЛЕЦКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

СПЕКТРАЛЬНАЯ И УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИКИ ТУШЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛ ДОНОРА В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Экспериментально изучена кинетика тушения люминесценции молекул донора Акридинового оранжевого в одномерных фотонных кристаллах на основе окисленного мезопористого кремния в отсутствие и в присутствии молекул акцептора Метиленового голубого. Получены зависимости среднего времени жизни Акридинового оранжевого от угла детектирования люминесценции и длины волны. Проведено сравнение полученных зависимостей с аналогичными зависимостями для мезопористого кварца, и имеющиеся отличия объяснены в терминах модифицированной локальной плотности электромагнитных мод, присущей среде фотонного кристалла.

Yu.A. STROKOVA, S.E. SVYAKHOVSKIY, A.M. SALETSKY
Lomonosov Moscow State University

SPECTRAL AND ANGULAR DEPENDENCE OF DONOR MOLECULES LUMINESCENCE DECAY KINETICS IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

Luminescence kinetics of Acridine orange donor molecules in a one-dimensional annealed mesoporous silicon photonic crystal has been investigated experimentally in the absence and in the presence of Methylene blue acceptor molecules. Acridine orange average lifetime dependences on a detection angle and a wavelength are obtained. These dependencies have been compared with the same ones for the mesoporous quartz and the differences have been explained in terms of modified local density of photonic states appropriate to a photonic crystal medium.

Фотонные кристаллы (ФК) на основе мезопористого кварца могут служить матрицей для молекул органических красителей и значительно модифицируют спектральные свойства молекул в случае перекрытия спектров с фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ). В свою очередь изменение спектральных свойств люминофоров позволяет судить о свойствах ФК.

Влияние матрицы ФК на безызлучательный перенос энергии между люминофорами является слабо изученным. Имеются теоретические работы, предсказывающие как подавление, так и усиление переноса

энергии в матрице ФК [1, 2]. Немногочисленные экспериментальные работы свидетельствуют об увеличении эффективности переноса энергии в случае перекрытия спектра излучения донора с ФЗЗ [3].

Проведено экспериментальное исследование кинетики тушения молекул Акридинового оранжевого (АО) в отсутствие и в присутствии молекул Метиленового голубого (МГ) в образцах ФК на основе мезопористого кварца и образцах пористого кварца, изготовленных по методике [4]. Определено среднее время жизни АО и построены зависимости последнего от угла детектирования и длины волны. На рис. 1а приведен пример полученной зависимости. На рис. 1б представлены спектры пропускания ФК (3) и люминесценции АО в ФК.

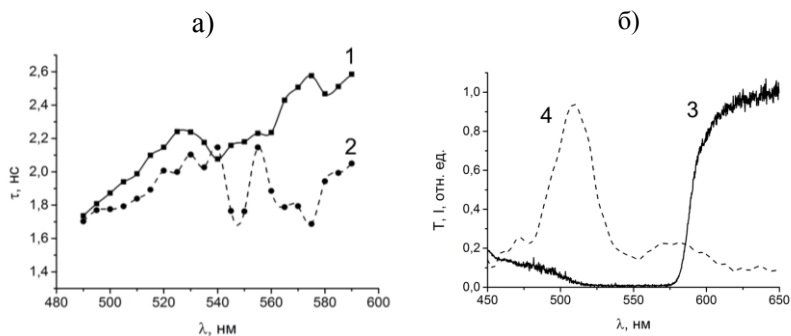


Рис. 1. Зависимость среднего времени жизни АО от длины волны при угле детектирования 0° в отсутствие (1) и в присутствии акцептора (2) (а); спектры пропускания ФК (3) и люминесценции АО в ФК при угле детектирования 0° (б)

Таким образом, наблюдается сокращение среднего времени жизни АО в интервале длин волн, коррелирующем с положением ФЗЗ, обусловленное модифицированной локальной плотностью электромагнитных мод внутри ФЗЗ и по ее краям.

Список литературы

1. Kurizki G., Genack A. // Phys. Rev. Let. 1988. V. 61. No. 19. P. 2269-2271.
2. Kobayashi T., Zheng Q., Sekiguchi T. // Phys. Rev. A. 1995. V. 52. No. 4. P. 2835- 2846.
3. Kedia S., Sinha S. // Optics Communications. 2015. V. 339. P. 41-46.
4. Svyakhovskiy S.E., Maydykovsky A.I., Murzina T. V. // Journal of Applied Physics. 2012. V. 112, P. 013106.

Н.Н. СИТНИКОВ^{1,2}, А.В. ШЕЛЯКОВ¹, И.А. ХАБИБУЛЛИНА²,
Р.В. СУНДЕЕВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

³Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии
им. И.П. Бардина, Москва

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ TiNiCu С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ

Методом сверхбыстрой закалки из расплава со скоростью охлаждения около 10^6 К/с получены аморфные ленты сплава $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ ($x = 30-38$ ат. %) толщиной 40-50 мкм и шириной от 8 до 20 мм. Показано, что сплавы с содержанием меди 30-34 ат. % при термической кристаллизации в калориметре испытывают объёмную или первичную кристаллизацию с образованием фазы B2 аустенита. В сплавах с содержанием меди более 34 ат. % наблюдаются два разделённых пика кристаллизации, ответственных за эвтектическую кристаллизацию двухфазной структуры (B2 + B11).

N.N. SITNIKOV^{1,2}, A.V. SHELYAKOV¹, I.A. KHABIBULLINA²,
R.V. SUNDEEV³

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

²Keldysh Research Center, Moscow

³Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow

FEATURES OF THERMAL CRYSTALLIZATION OF AMORPHOUS TiNiCu ALLOYS WITH HIGH COPPER CONTENT

Amorphous ribbons of the $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ alloy ($x = 30-38$ at. %) of 40-50 μm thick and 8-20 mm wide are produced by the method of ultra-rapid quenching from the melt at a cooling rate of about 10^6 K/s. It is shown that during thermal crystallization in the calorimeter the alloys with a copper content of 30-34 at. % undergo bulk or primary crystallization with the formation of the B2 phase of austenite. In the alloys with a copper content of more than 34 at. % there are two separated crystallization peaks responsible for the eutectic crystallization of the two-phase structure (B2 + B11).

В последнее время показана эффективность использования сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ), в особенности, тонких пленок и лент, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава, для создания

различного рода микроустройств, в том числе миниатюрных устройств управления оптическим излучением [1, 2]. Расширение функциональных возможностей таких устройств может быть достигнуто за счет разработки новых наноструктурированных материалов с ЭПФ, полученных, в частности, управляемой кристаллизацией аморфного состояния.

В данной работе объектом исследования являлись сплавы системы TiNi–TiCu с постоянным содержанием титана 50 ат. % и содержанием меди от 30 до 38 ат. %, которые были изготовлены методом планарного литья при скорости охлаждения расплава $10^6 \text{ K}\cdot\text{c}^{-1}$ в виде аморфных лент толщиной 40-50 мкм и шириной от 8 до 20 мм.

Структурные свойства сплавов и фазовые превращения в них изучались методами металлографии, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновского дифракционного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Установлено, что после закалки все полученные сплавы находятся в аморфном состоянии. Термическая кристаллизация сплавов проводилась в камере ДСК при скорости нагрева $20 \text{ K}\cdot\text{мин}^{-1}$. Показано, что сплавы с содержанием меди 30-34 ат. % испытывают объёмную или первичную кристаллизацию с образованием фазы В2 (типа CsCl) аустенита, причём при увеличении содержания меди наблюдается снижение температур начала кристаллизации. При последующем охлаждении до комнатной температуры в таких сплавах наблюдается термоупругое мартенситное превращение В2→В19, характерные температуры которого понижаются с увеличением содержания меди. В то же время в сплавах с содержанием меди более 34 ат. % наблюдаются два разделённых пика кристаллизации, ответственных за эвтектическую кристаллизацию двухфазной структуры В2 + В11 (TiCu), как это наблюдалось в [3]. Охлаждение таких сплавов до комнатной температуры не приводит к каким-либо структурным превращениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00805 А.

Список литературы

1. Kohl M., Ossmer H., Gueltig M., Megnin C. // *Shap. Mem. Superelasticity*. 2018. V. 4. P.127-142.
2. Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. // *Mater. Des.* 2014. V. 56. P. 1078-1113.
3. Santamarta R., Schryvers D. // *Intermetallics*. 2004. V. 12. P. 341-346.

Е.А. АНТОНЬЧЕВА, И.С. ДОЛГОПОЛОВ, М.С. ПЕТРОВА,
Н.Н. ПРОКОПИВ, А.В. СЮЙ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ЗАВИСИМОСТИ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ
АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕД
ОТ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Приведены результаты экспериментов по выявлению зависимости двулучепреломления анизотропных оптически активных сред от величины прикладываемого внешнего электрического поля. Создана программа ЭВМ для автоматизированного определения двулучепреломления под воздействием внешнего электрического поля до 10 кВ/см.

E.A. ANTONYCHEVA, I.S. DOLGOPOLOV, M.S. PETROVA,
N.N. PROKOPIV, A.V. SYUY

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

**AUTOMATED INSTALLATION FOR THE STUDY
OF THE DEPENDENCE OF THE BIREFRINGENCE
OF ANISOTROPIC OPTICALLY ACTIVE MEDIA
FROM AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD**

Presents the result of experiments on the identify a dependence of the birefringence of anisotropic optically active media on the magnitude of the applied external electric field. A computer program was created for the automated determination of birefringence under the influence of an external electric field of up to 10 kV/cm.

Оптически активные среды получили широкое применение в науке и технике, например при производстве мониторов, ЖК-панелей, ЖК-индикаторов и т.п. [1]. Также оптически активные среды используются в медицине при производстве лекарственных препаратов, диагностике различных заболеваний [2, 3]. При практическом использовании явления оптической активности, последнюю обычно индуцируют путем приложения внешних физических полей, например электрических. В анизотропных средах при приложении внешнего электрического поля всегда возникает наведенное двулучепреломление или при переносе заряда в тонких полупроводниковых жидкокристаллических пленках

[4, 5], которое необходимо учитывать. Существуют различные способы определения величины оптической активности, также как и методы определения двулучепреломления. Одновременный учет этих двух эффектов необходимо производить в практическом исполнении в виде каких-то приборов и устройств.

Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости величины двулучепреломления в оптически активных средах при приложении внешнего электрического поля. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Мы использовали гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632,8$ мкм, $P = 3$ мВт, $d = 1,8$ мм). Разработана программа ЭВМ для автоматического определения величины двулучепреломления от значения прикладываемого электрического поля с учетом естественной оптической активности вещества.

Поляризационный метод позволяет определять величину двулучепреломления по известным соотношениям интенсивности падающего и прошедшего излучения через анизотропную среду [6]. Предварительно определяется величина оптической активности (вклад в интенсивность прошедшего излучения). По отношению интенсивностей с учетом влияния оптической активности автоматически определяется величина двулучепреломления.

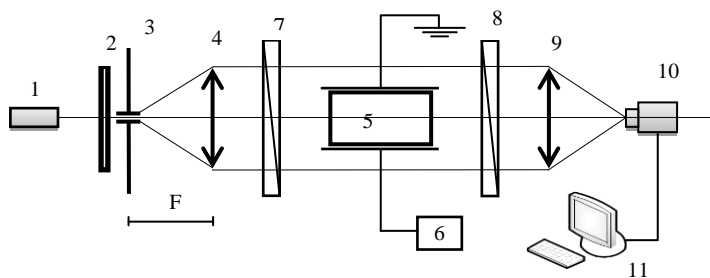


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 - лазер, 2 - рассеиватель, 3 - диафрагма, 4, 9 - линзы, 5 - образец, 6 - источник напряжения, 7, 8 - поляризаторы, 10 - цифровая видеокамера, 11 - компьютер

Список литературы

1. Oraie M., Latifi H. // Optics and Laser Technology. 2019. V. 111. P. 303-306.
2. Ma H., Kang Q., Wang T., Yu L. // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2019. V. 173. P. 616-622.
3. Zhou L., Kang Q., Hu O., Yu L. // Analytica Chimica Acta. 2018. V. 1040. P. 187-195.
4. Keum C.-M., Liu S., Al-Shadeedi A., et. al. // Scientific Reports. 2018. V. 8(1). P. 699.
5. Sinha D., Banerjee D. // Optik. 2018. V. 174. P. 698-706.
6. Ландсберг Г.С. Оптика. 6-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

С.А. АЛИЕВ, А.Р. РАВИН, К.Д. ПАХЛАВОНОВА,
Н.С. ТРОФИМОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

**КАЛЬКУЛЯТОР РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТРЕХСЛОЙНОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ЗАМЕДЛЕНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ МОД**

В работе рассматривается создание приложения для быстрого анализа измеренных данных тонкой пленки в волноводном режиме. Для решения дисперсионных уравнений рассматривались методы дихотомии, хорд и касательных, и итерации. Тестирование калькулятора осуществлялось на примере простой задачи расчета трехслойной волноводной структуры. Нахождение оптических параметров волновода, показателя преломления и толщины происходило на основе полученных экспериментально коэффициентов замедления волноводных мод.

S.A. ALIEV, A.R. RAVIN, K.D. PACHLAVONOVA,
N.S. TROFIMOV, T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

**APPLICATION FOR CALCULATING OPTICAL
PARAMETERS OF THREE-LAYER THIN FILM STRUCTURE
ACCORDING TO THE RESULTS OF WAVE-WATERED
MODES COEFFICIENTS MEASUREMENTS**

In this article were considered the creation of the application for the rapid analysis of the measured data of a thin film in the waveguide mode. The methods of dichotomy, chords and tangents, and iteration were considered to solve the dispersion equations. Testing of the calculator was carried out on the example of a simple task of calculating a three-layer waveguide structure. The optical parameters of the waveguide, refractive index and thickness were determined using the experimentally obtained deceleration rates in the waveguide mode.

Показатель преломления и толщину пленок возможно определить измерением коэффициентов замедления волноводных мод. В основе такого метода лежит волноводное распространение света по пленке, показатель преломления которой больше показателя преломления подложки [1, 2]. Решение системы дисперсионных уравнений для двух

типов волн (рис. 1), распространяющихся по пленке с измеренными эффективными показателями преломления (ЭПП), дает значения показателя преломления и толщины пленки при заданной длине волны для измеренных коэффициентов замедления. Возбуждение волновода осуществляется на TE_1 - и TM_1 - модах через призмное устройство связи при соответствующих этим модам резонансных углах θ .

$$\frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_2^2 - n_{эффTE}^2} = \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{n_{эффTE}^2 - n_1^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_{эффTE}^2}} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{n_{эффTE}^2 - n_3^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_{эффTE}^2}} \right) \right) + \pi \times (v - 1)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_2^2 - n_{эффTM}^2} = \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{n_{эффTM}^2 - n_1^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_{эффTM}^2}} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{n_{эффTM}^2 - n_3^2}}{\sqrt{n_2^2 - n_{эффTM}^2}} \right) \right) + \pi \times (v - 1)$$

Рис. 1. Дисперсионные уравнения, где λ - длина волны источника излучения, $n_{эфф}$ - эффективный показатель преломления волноводной моды; n_1, n_2, n_3 - показатели преломления воздуха, пленки и подложки; v - номер волноводной моды

Был разработан калькулятор расчетов оптических параметров трехслойной тонкопленочной структуры, используя языки программирования pascal и c++. Разработана оболочка программы с окнами ввода и вывода. На ввод подаются данные показателей преломления обрамляющих сред и призмы ввода, её угол, длина волны излучения лазера, точность расчета, углы нормали и возбуждения мод в градусах, минутах, секундах. Выводятся показатель преломления и толщина волноводного слоя. Рассмотрены методы расчетов трансцендентных уравнений такие, как метод дихотомии, итерации, касательных и хорд. Данное приложение носит прикладной характер, позволяя уменьшить время на обработку экспериментальных данных, в особенности, если требуется серия промежуточных измерений нескольких образцов в лабораторных условиях. В будущем планируется добавить расчет температурной зависимости.

Список литературы

1. Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. Исследование температурного коэффициента эффективного показателя преломления оптических золь-гель волноводов с использованием модуля Пельтье // Автометрия. 2013. Т. 49. № 3. С. 121-128.
2. Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. Исследование температурного оптического коэффициента золь-гель волноводов // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2011. № 1. С. 144-155.

М.М. ВЕКШИН, М.А. КУПЛЕВИЧ, В.А. НИКИТИН,
Н.А. ЯКОВЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМОДОВЫХ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ
1,55 мкм ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В СТЕКЛЕ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИОННЫМ ОБМЕНОМ K^+Na^+**

Изготовлены интегрально-оптические волноводы в подложках из фотопластин и стекла К-8 методом ионного обмена, проводимого в расплаве соли KNO_3 , для использования на длине волны 1,55 мкм. На основе фотопластин были сформированы одномодовые канальные волноводы с эффективным размером модового поля 11x7 мкм. В стекле К-8 проявляется процесс блокировки внедряемых ионов калия, что затрудняет процесс формирования волноводов на указанной длине волны.

М.М. VEKSHIN, М.А. KUPLEVICH, V.A. NIKITIN,
N.A. YAKOVENKO

Kuban State University, Krasnodar

**STUDY OF SINGLE-MODE AT WAVELENGTH 1,55 μm
OPTIC WAVEGUIDES IN GLASS,
FABRICATED BY ION EXCHANGE K^+Na^+**

The integrated-optic waveguides in substrates of glass for photographic plates and K-8 type glass, have been fabricated by ion exchange in KNO_3 salt melt for application at wavelength 1,55 μm . The single-mode channel waveguides in photographic glass plates has been fabricated with effective mode size 11x7 μm . In glass K-8 the incoming potassium ions are essentially blocked, and it is difficult to make waveguide for pointed wavelength.

Интегрально-оптические схемы используются в волоконно-оптических системах связи и в оптических датчиках физических величин и химико-биологических процессов. Технология ионного обмена в стекле позволяет создавать пассивные волноводные структуры различной топологии [1].

Целью работы было изготовление канальных интегрально-оптических волноводов, одномодовых на длине волны 1,55 мкм, методом ионного обмена из расплава соли KNO_3 в 2 типах стеклянных подложек: в подложках из фотопластин и оптического стекла К-8.

Согласно технологии изготовления волноводов методом ионного обмена в стекле, на стеклянную подложку наносился маскирующий слой алюминия, в нем формировались щели шириной 3 мкм фотолитографией с использованием фоторезиста ФП-383, экспонирование которого проводилось на установке безмасковой литографии $\mu\text{PG-101}$. Подготовленная таким образом подложка помещалась в расплав соли KNO_3 . В процессе ионного обмена ионы калия внедрялись в стекло, что приводило к увеличению показателя преломления в области щели в маске.

Были предприняты попытки сформировать одномодовые K^+ -волноводы в оптическом стекле К-8 на длине волны 1,55 мкм. Однако было установлено, что на основе этого типа стеклянной подложки изготовить волновод, который бы поддерживал волноводным режим, возможно только при очень больших временах ионного обмена и повышенной температуре. Волновод был сформирован только при температуре 440 °С в течение 8 ч. Измеренные размеры поля моды составили 15*20 мкм. Причина трудностей формирования K^+ -волноводов на длине волны 1,55 мкм состоит в невысокой скорости проникновения калия в стекло и значительном механическом напряжении в подложке, что приводит к “насыщению” глубины диффузии.

В подложках из фотопластин одномодовые на длине волны 1,55 мкм волноводы были получены с более приемлемыми размерами. Ионный обмен проводился при температуре 380 °С, время ионного обмена – 3 ч. На рис. 1 показано измеренное с помощью специализированной ПЗС-камеры с рабочей длиной длин 1,55 мкм распределение интенсивности на торце такого волновода. Размеры модового поля составили 11x7 мкм.

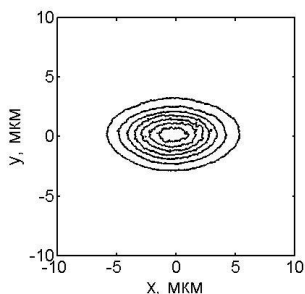


Рис. 1. Измеренное распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце K^+ -волновода в стекле

Список литературы

1. Никитин В.А., Яковенко Н.А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар, Из-во КубГУ, 2013.

Я.В. ПРЖИЯЛКОВСКИЙ^{2,1}, Н.И. СТАРОСТИН^{1,2}, В.П. ГУБИН^{1,2},
С.К. МОРШНЕВ^{1,2}

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*ООО «НПЦ Профотек», Москва*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

В работе теоретически и экспериментально изучены особенности регистрации коротких токовых импульсов низкокогерентным интерферометрическим волоконно-оптическим датчиком электрического тока на основе эффекта Фарадея. Проанализированы основные факторы, определяющие выходные характеристики датчика: неполное накопление фазового сдвига при малой длительности импульса, влияние поляризационной модовой дисперсии магниточувствительного spun-световода и РМ световода линии задержки. Продемонстрирована модернизированная схема датчика, позволяющая до 5 раз уменьшить его шум интенсивности.

Ya. V. PRZHIYALKOVSKIY^{2,1}, N. I. STAROSTIN^{1,2}, V. P. GUBIN^{1,2},
S. K. MORSHNEV^{1,2}

¹*Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

²*SPC Profotech, Moscow*

THE FIBER OPTICAL SENSOR OF CURRENT PULSES

The registration of short current pulses using a low-coherence interferometric fiber-optic sensor of electric current based on the Faraday effect has been studied theoretically and experimentally. The main factors that determine characteristics of the sensor are analyzed: incomplete accumulation of the Faraday phase shift at a short pulse duration, polarization mode dispersion of the magnetosensitive spun fiber and PM fiber of the delay line. The modernized sensor which allows to reduce its intensity noise by up to 5 times is demonstrated.

Волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ) в настоящее время демонстрируют устойчивый рост практического применения в электроэнергетике и электрометаллургии [1]. Основой современных ВОДТ является низкокогерентный волоконно-оптический интерферометр, фазовый сдвиг между волнами которого индуцируется магнитным полем тока вследствие эффекта Фарадея. Малая инерционность эффекта Фарадея ($\sim 10^{-9}$ с) позволяет использовать

указанный метод для регистрации импульсных токов, что может найти применение в линейных импульсных ускорителях электронов или в установках для разогрева и сжатия плазмы [2-4].

Данная работа представляет собой исследование характеристик отклика ВОДТ на короткий импульс тока. Основная особенность измерения импульсов тока оптическим методом заключается в неполном накоплении Фарадеевского фазового сдвига в случае длительности импульса тока сравнимой или меньшей времени распространения света в чувствительном волокне датчика. Как следствие, форма выходного сигнала может существенно отличаться от формы импульса тока. В частности, для прямоугольного импульса тока, как показано в работе, сигнал отклика ВОДТ имеет линейные фронты, продолжительность которых определяется отношением времени распространения излучения в чувствительном волокне и длительности импульса тока.

Одной из важных характеристик ВОДТ при регистрации импульсов тока является уровень шума выходного сигнала. В современных датчиках, в которых обычно используются низкокогерентные источники оптического излучения, основной вклад в шум дают фотонный шум, связанный с квантовой природой света, и избыточный шум интенсивности, определяемый биениями спектрального компонента излучения. Относительный уровень шума интенсивности, в отличие от фотонного шума, не может быть снижен увеличением мощности излучения, однако свойства данного шума позволяют использовать компенсирующие подходы для его уменьшения. В модернизированном варианте ВОДТ продемонстрировано снижение шума интенсивности выходного сигнала до 5 раз.

Кроме того, в работе было изучено влияние поляризационной модовой дисперсии (ПМД) световодов, применяемых в ВОДТ. Показано, что применение *sppn*-световода в качестве чувствительного элемента ВОДТ с отражательной конфигурацией интерферометра не искажает отклик датчика. В то же время волокно, сохраняющее линейную поляризацию (РМ волокно), используемое в соединительной линии может привести к существенному искажению выходного сигнала.

Список литературы

1. Starostin N., Ryabko M., Chamorovskii Y., et al. // Key Eng. Mat. 2010. V. 437. P. 314-318.
2. Пименов А.В., Казачков Ю.П. // Патент РФ на изобретение №2262709. 30.08.2004.
3. Жилин А.Н., Ловчий И.Л. // XII Межд. конф. "Прикладная оптика 2016", Санкт-Петербург: Сборник трудов. Т. 1. С. 244.
4. Moreau Ph., Brichard B., Fil A., et. al. // Fusion Engineering and Design. 2011. V. 86. P. 1222.

В.В. ГАВРУШКО, А.С. ИОНОВ¹, О.Р. КАДРИЕВ, В.А. ЛАСТКИН¹
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
¹*ОАО «Планета ОКБ», Великий Новгород*

ТОКОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Приводятся результаты исследования абсолютной токовой чувствительности дифференциальных фотоприемников на основе кремния. При изменении размеров приемной площадки от 6 до 24 мм² монохроматическая токовая чувствительность для всех фотоприемников при $\lambda_{\max} = 0.36$ мкм имела близкое значение, около 0.06 А/Вт.

V.V. GAVRUŠKO, A.S. IONOV¹, O.R. KADRIEV, V.A. LASTKIN¹
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University
¹*OJCK «OKB-Planet», Velikiy Novgorod*

CURRENT SENSITIVITY OF DIFFERENTIAL PHOTO RECEIVERS BASED ON SILICON

The results of researches current sensitivity differential photodetectors based on Silicon. When resizing the reception venues from 6 to 24 mm² plane current sensitivity for all photodetectors with $\lambda_{\max} = 0.36$ μm had close value about 0.06 A/W.

По сравнению с традиционными фотоприемниками на основе кремния, дифференциальные имеют сравнительно узкую спектральную характеристику с ярко выраженным максимумом в ультрафиолетовой области. Они обладают достоинствами, связанными с невысокой стоимостью кремниевой технологии, возможностью в широких пределах изменять размеры фоточувствительных площадок, возможностью получения селективной спектральной характеристики. Вместе с тем в литературе нет сведений об одном из важнейших параметров таких фотоприемников, связанных со значением их абсолютной чувствительности. В настоящей работе приводятся результаты исследования абсолютной токовой чувствительности дифференциальных фотоприемников, с различными размерами чувствительных площадок. Размеры приемных площадок фотоприемников задавались путем параллельного включения ряда подобных модулей, собранных в одном корпусе. Каждый модуль представлял собой систему из 16 одинаковых по размеру фотодиодов, разбитых на две группы. Технология фотодиодов

первой группы обеспечивала высокую чувствительность в широком спектральном интервале, а чувствительность фотодиодов второй группы была подавлена в УФ-области, путем создания центров рекомбинации в приповерхностной области. Измерение токовой чувствительности производилось с использованием УФ светодиода, с пиком излучения на длине волны 0.36 мкм, что совпадало с максимумом чувствительности фотоприемника, имеющего спектральный диапазон 0,28...0,46 мкм по уровню 0,5. В качестве приемника сравнения использовался фотодиод ФДУК-10. На рис. 1 приведены полученные зависимости токовой чувствительности от размера приемной площадки. Как видно, при увеличении площади приемных площадок в 4 раза токовая чувствительность имела близкие значения около 0.06 А/Вт. Расчет токовой чувствительности с учетом особенностей топологии фотоприемника и необходимостью вычитания сигналов давал значение при $\lambda=0.36$ мкм 0.082 А/Вт. Тогда суммарные потери, включающие отражение сигналов, составят 27% относительно расчетных значений, что можно считать вполне удовлетворительным результатом. Близкие значения токовой чувствительности с увеличением размеров приемной площадки позволяют в широких пределах увеличивать чувствительность фотоприемника к освещенности. Необходимое число модулей может набираться на заключительных операциях сборки приборов, без изменений основных технологических операций. Это является одним из существенных преимуществ таких фотоприемников.

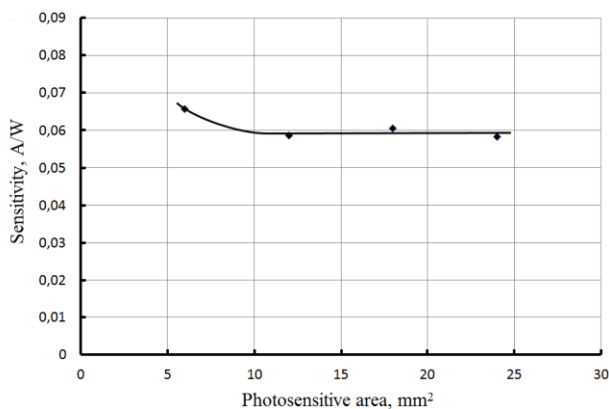


Рис. 1. Зависимость чувствительности фотоприемников от площади приемных площадок

С.К. МОРШНЕВ^{1,2}, В.П. ГУБИН^{1,2}, Н.И. СТАРОСТИН^{1,2},
Я.В. ПРЖИЯЛКОВСКИЙ^{2,1}, А.И. САЗОНОВ^{1,2}

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

²ООО «НПЦ Профотек», Москва

ОСЦИЛЛЯЦИИ КОНТРАСТА ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДАТЧИКА ТОКА

В докладе сообщается о наблюдении периодических вариаций контраста волоконного интерферометра датчика тока при изменении температуры магниточувствительного spun-волокна, уложенного в многовитковый контур малого радиуса. Установлены физические причины наблюдаемого эффекта и дано его объяснение на основе модели spun-волокна со спиральной структурой осей встроеного линейного ДЛП.

S.K. MORSHNEV^{1,2}, V.P. GUBIN^{1,2}, N.I. STAROSTIN^{1,2},
Ya.V. PRZHIYALKOVSKIY^{2,1}, A.I. SAZONOV^{1,2}

¹Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

²SPC Profotech, Moscow

THE CONTRAST OSCILLATION OF A REFLECTION FIBER INTERFEROMETER OF A CURRENT SENSOR

The report describes the observation of periodic variation of interferometer contrast in a current sensor with temperature change of a magnetically sensitive spun fiber, laid in the form of a multiturn coil of a small radius. The physical factors of this effect are shown and it is given the effect explanation using a model that considers a helical structure of the built-in linear birefringence axes in spun-fiber.

Схема отражательного интерферометра, используемая в датчиках тока на эффекте Фарадея, позволяет при прямом проходе накопить настолько большую фазовую задержку между волнами ортогональных линейных поляризаций, что они становятся некогерентными. На входе в магниточувствительный контур линейная поляризация преобразуется в циркулярную. С магнитным полем тока каждая волна взаимодействует независимо. После отражения от зеркала на конце контура эти волны меняются поляризациями и возвращаются к приемнику практически полностью компенсируя накопленные фазовые задержки, кроме фарадеевских. В результате эти волны могут интерферировать, из интерференционной картины извлекают информацию о величине

электрического тока. Контраст интерференционной картины – один из основных параметров датчика тока, определяющий его чувствительность.

Магниточувствительный контур изготавливают из *srpn*-волокна [1], которое хотя и не поддерживает циркулярные компоненты волн [2], но сохраняет направление вращения электрического вектора в эллиптических поляризациях, по которым идет эволюция поляризационных состояний (ПС) излучения в волокне. Это свойство позволяет накапливать эффект Фарадея с длиной волокна в контуре. В ряде случаев применения датчика желательно минимизировать радиус его катушки. Экспериментальные исследования контура радиусом $R = 14$ мм при температурах от -40 до $+60$ °С продемонстрировали осцилляции контраста амплитудой $\sim 6\%$ при среднем значении 80% . Период осцилляций $\Delta T \sim 34$ °С. При $R > 100$ мм осцилляции отсутствовали.

Наши исследования *srpn*-волокна [3, 4] показали, что поведение ПС излучения в этом волокне хорошо описывается моделью спиральной структуры осей линейного двулучепреломления (ДЛП). Согласно этой модели, ПС излучения, прошедшего длину L_{pr} , возвращаются к исходной циркулярной поляризации. На этой длине ПС могут быть эллиптическими с углом эллиптичности тем меньшим, чем меньше радиус катушки *srpn*-волокна в контуре. Длину контура до зеркала L_c можно представить в виде $L_c = N * L_{pr} + \Delta L_{pr}$, где N – целое число, а $\Delta L_{pr} < L_{pr}$ (последний участок перед зеркалом). При этом величина ΔL_{pr} определяет эллиптичность излучения на зеркале. Эллиптически поляризованную волну можно разложить по двум циркулярным волнам: сильную с исходным направлением вращения и слабую ортогональную. После отражения в зеркале сильная волна будет компенсировать паразитные фазовые набеги, а слабая, продолжая накапливать паразитные набеги, потеряет возможность участвовать в интерференции, понижая тем самым контраст интерференционной картины. Из-за температурной зависимости встроенного линейного ДЛП [5] в *srpn*-волокне наблюдаются изменения длины L_{pr} с температурой. При этом изменяется величина остаточного участка ΔL_{pr} перед зеркалом, и как следствие эллиптичность излучения на зеркале, что приводит к периодической осцилляции контраста интерференционной картины.

Список литературы

1. Laming R.I., Payne D.N. // J.Lightwave Technol. 1989. V. 7(12). P.2084.
2. Губин В.П., Исаев В.А. и др. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36 (3). С. 287.
3. Моршнев С.К., Губин В.П. и др. // Квантовая электроника. 2009, Т. 39(3). С. 287.
4. Przhiyalkovsky Y.V., Vasiliev S.A., et. al. // J. Appl. Physics, 2017, V. 122(12). P. 123104.
5. Моршнев С.К., Губин В.П. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43(12). С. 1143.

С.И. ХАЛИЛОВ, А.Ф. РЫБАСЬ, Б.В. СОКОЛЕНКО,
Я.Е. АКИМОВА, М.В. БРЕЦЬКО

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВИХРЕВОЙ СОСТАВ ПОЛЯ НАВИТОГО МАЛОМОДОВОГО ВОЛОКНА

Экспериментально найдены условия, при которых циркулярно поляризованный оптический вихрь в ходе распространения по навитому оптическому волокну, сохраняет знак поляризации и величину топологического заряда пучка. Также, была измерена векторная структура и вихревой спектр поля волокна, подтверждающая результаты.

S.I. HALILOV, A.F. RUBASS, B.V. SOKOLENKO,
Ya.E. AKIMOVA, M.V. BRETSKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE VORTEX COMPOSITION OF THE FIELD WOUND LOW-MODE FIBER

Experimental conditions were found under which the circularly polarized optical vortex during propagation along the wound optical fiber retains the sign of polarization and the magnitude of the topological charge of the beam. Also, the vector structure and the vortex spectrum of the fiber field were measured, confirming the results.

Использование оптических вихрей (ОВ) в качестве кодирующего сигнала, позволит увеличить число информационных каналов в волоконно-оптических линиях связи [1]. При такой методике, волокно должно работать в маломодовом ($2,4 < V < 10$) или в многомодовом режиме ($V \geq 10$) [2], для существования в нем вихревых мод. Но при таких значениях волноводного параметра, в волокне еще существует фундаментальная и невихревые моды, которые относятся к шуму и негативно влияют на конечное поле. Поэтому, целью работы явилось: найти условие при которых ОВ в ходе прохождения через волокно, сохраняет все свои исходные параметры, а в частности, состояние поляризации и величину топологического заряда.

Для решения поставленной задачи, волокно навивалось на кварцевый цилиндр, с тем же показателем преломления (для избавления от механических напряжений на границе волокно-цилиндр). В ходе такой навивки, в волокне создавалась наведенная анизотропия, которая смещала

к периферии фундаментальную моду, а невихревые моды высвечивала, формируя в сердцевине волокна-вихрь, с состоянием поляризации (σ_z) и величиной топологического заряда (l), что и на входе в волокно. Для волокна с $V=3.8$, шаг витка составил $H=2$ мм, число витков $n=21$ и радиус кривизны навивки в каждой точке составил $R=1.5$ мм.

Измерение и построение векторного поля волокна, проводилась при помощи дифференциального поляриметра, работающего на основании параметров Стокса [4]. А вихревой спектр, измеряли методом предложенный авторами [3]. Как видно из диаграммы (рис. 1), при $n=21$ витков, энергия с $\sigma_z = -1$ компоненты, перекачивается в $\sigma_z = +1$, формируя поле, имеющее то ж состояние поляризации и величину топологического заряда, что и на входе в волокно.

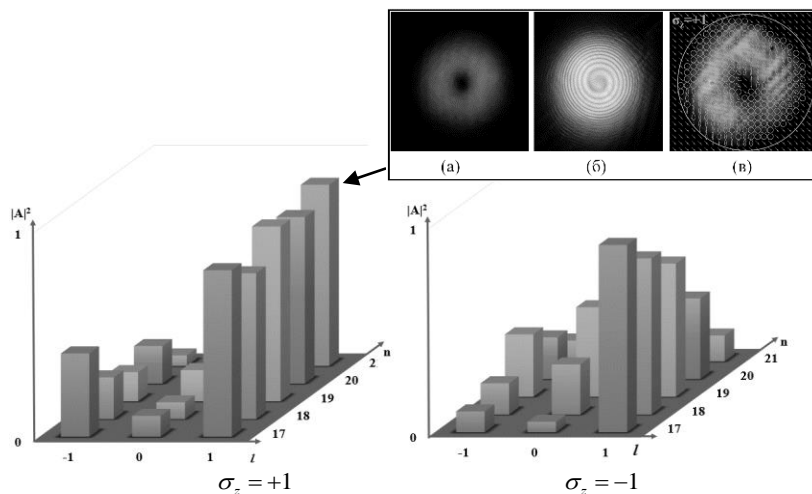


Рис. 1. Диаграмма вихревого спектра поля малоимодового волокна в ортогональных компонентах, от числа витков при распространении ОБ с $l=+1$ и $\sigma_z = +1$; на вклейке: распределение интенсивности (а), интерферограмма (б) и векторное состояние поля волокна (в), при $n = 21$ витках, $H = 2$ мм и $R = 1.5$ мм.

Список литературы

1. Halilov S.I., Piyasova A.A., et. al. // JPCS. 2016. V. 737.
2. Ibragimov A.E., Rubass A.F., et. al. // JPCS. 2018. V. 1062.
3. Volyar A., Bretsko M., et. al. // Optics Letters. 2018. V. 43.
4. Воляр А.В., Фадеева Т.А. Дифференциальный поляриметр. Патент Украины №65939.

Опубл. 15.04.2004.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПО СПЕКТРУ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА

Рассмотрены вопросы классификации разновидностей оптических волокон по рефлектограммам, полученным с помощью бриллюэновского рефлектометра. Представлена разработанная программа для определения типа оптического волокна по бриллюэновской рефлектограмме.

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

THE DEFINITION OF THE OPTICAL FIBER TYPE BY ANALYSIS OF THE BRILLOUIN BACKSCATTER SPECTRUM

The questions of classification of types of optical fibers according to the trace obtained by Brillouin reflectometer are considered. The developed program for determining the type of optical fiber by Brillouin reflectogram is presented.

Для обнаружения участков оптических волокон (ОВ) с повышенным натяжением и изменённой температурой применяются бриллюэновские рефлектометры (BOTDR). BOTDR анализирует распределение спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (СРМБ) вдоль ОВ и определяет картину натяжения ОВ [1, 2]. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, для разных типов ОВ и разных производителей ОВ формы профилей СРМБ, а также «планки начального уровня» (f_{BO}) (при комнатной температуре и при отсутствии механических натяжений) различаются [1, 2].

Для каждой разновидности ОВ следует определить свой уровень f_{BO} . Для обнаружения участков с изменённой температурой и натяжением желательно иметь эталонную BOTDR-рефлектограмму для исследуемого ОВ при комнатной температуре и при отсутствии механических натяжений, что упрощает своевременное обнаружение «проблемного» участка в ОВ и устранение проблемной ситуации в ВОЛС до разрушения её ОВ [1, 2]. База данных профилей СРМБ волокон различных типов и производителей позволяет классифицировать ОВ в ВОЛС, а также обнаруживать дефектные участки [2, 3]. Описанная ниже программа была разработана с целью быстрого определения типа ОВ. Пользователем в

программу загружается изображение из файла рефлектограмм BOTDR. После анализа рефлектограммы формируется профиль СРМБ ОБ [3]. Данные загруженного профиля заносятся в одномерный массив, после чего происходит сравнение его с ранее загруженными в программу шаблонами СРМБ; для высокой точности правильности определения типа рефлектограмм используется специальный алгоритм [1, 2]. На рис. 1 представлен экран, на котором программой было классифицировано однодупное ОБ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF, G.655).

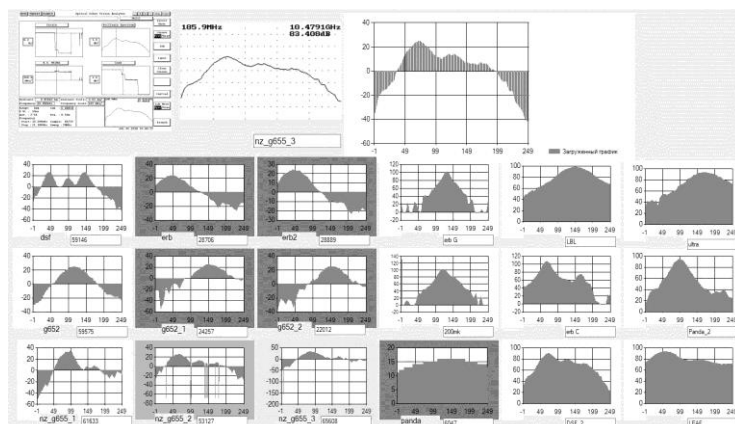


Рис. 1. Копия экрана программы при обнаружении образца G.655 (NZDSF)

Шаблон, который по оценкам программы имеет наилучшее совпадение с загруженным изображением, подсвечивается зелёным цветом, и его название записывается для представления пользователю (см. рис. 1).

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

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части госзадания (проект № 8.9334.2017/8.9).

Список литературы

1. Богачков И.В. // Сб. тр. VII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 102-103.
2. Богачков И.В. и др. // Динамика систем, механизмов и машин, 2018. Т. 6. № 4. С. 96-100.
3. Богачков И.В., Иниватов Д.П., Чобан А. Г. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №23734. Опул. 14.08.2018.

Д.С. УКОЛОВ¹, М.Е. ЧЕРНЯК^{1,2}, Р.К. МОЖАЕВ¹,
А.А. ПЕЧЕНКИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ОДНОМОДОВОМ РАДИАЦИОННО СТОЙКОМ ОПТОВОЛОКНЕ ПРИ РАЗНЫХ МОЩНОСТЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Целью работы является экспериментальное исследование затухания оптического сигнала в одномодовом радиационно стойком оптическом волокне с нелегированной сердцевиной и фторированной оболочкой на воздействие ионизирующего излучения в зависимости от мощности воздействия.

D.S. UKOLOV¹, M.E. CHERNIAK^{1,2}, R.K. MOZHAEV^{1,2},
A.A. PECHENKIN^{1,2}

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

²Specialized Electronic Systems, Moscow

STUDY OF GAMMA-RAY INDUCED ATTENUATION OF SINGLEMODE RADIATION HARD OPTIC FIBER DEPENDING ON THE DOSE RATE

The aim of the work is an experimental study of the attenuation of optical signal in a single-mode radiation-resistant optical fiber with undoped core and fluorinated shell under ionizing radiation depending on ionizing dose rates.

При использовании ВОЛС в условиях повышенного радиационного фона одним из основных параметров оптоволоконных линий связи является коэффициент затухания оптического излучения. Перспективы применения волоконно-оптических систем передачи информации в условиях воздействия радиации ведут к необходимости исследования радиационно-оптических явлений в кварцевых оптических волокнах, поскольку под действием ионизирующего излучения эти волокна могут терять свою пропускную способность [1]. Основная причина роста потерь – генерация центров окраски и центров рассеяния в световедущей сердцевине или в светоотражающей оболочке под действием ионизирующего излучения, по которой в одномодовых волокнах

распространяется значительная часть света. Природа и количество центров окраски и центров рассеяния в значительной степени зависят от состава сердцевины и оболочки, от температуры окружающей среды, рабочей длины волны излучения, а также способа изготовления волокон.

Оптическое волокно было подвергнуто воздействию гамма излучения на установке с изотопным источником Co_{60} с мощностями испытательного воздействия 7,5, 25 и 100 ед./с (рис. 1 и 2). Уровень вводимой в оптическое волокно оптической мощности не более 5 мкВт, температура окружающей среды при проведении испытаний составляла минус 60 ± 5 °С, что соответствовало крайнему значению рабочего диапазона температур, такие условия являются критическими для работоспособности данного волокна.

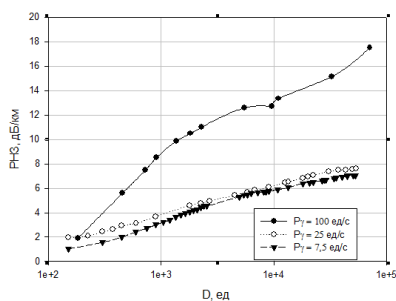


Рис. 1. Зависимости радиационно наведенного затухания в оптическом волокне (при температуре минус 60 ± 5 °С и длине волны $\lambda = 1310$ нм) от величины набранной дозы при различных мощностях испытательного воздействия

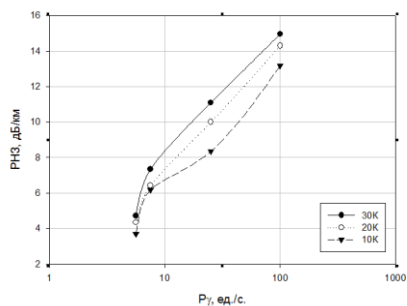


Рис. 2. Зависимости прироста наведенного затухания от мощности испытательного воздействия

Список литературы

1. Дианов Е.М., Корниенко Л.С., Никитин Е.П. и др. Радиационно-оптические свойства волоконных световодов на основе кварцевого стекла // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 3. С. 473.
2. Liu F., An Y., Wang P., Shao B., Chen S. Effects of Radiation on Optical Fibers // Recent Progress in Optical Fiber Research. Ed. M. Yasin. 2012. ISBN: 978-953-307-823-6.

К.Н. АЛЕКСЕЕВ, Е.В. БАРШАК, Д.В. ВИКУЛИН,
Б.П. ЛАПИН, М.А. ЯВОРСКИЙ

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ДИСПЕРСИЯ МОД ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ГРАДИЕНТНЫМ ПРОФИЛЕМ

В работе исследована проблема дисперсии оптических вихрей - мод высших порядков циркулярных оптических волокон с бесконечным параболическим профилем показателя преломления. Установлено, что между оптическими вихрями имеет место как стандартная поляризационная, так и модовая дисперсия принципиально нового типа - топологическая. Численно исследована зависимость дисперсии оптических вихрей от длины волны излучения.

C.N. ALEXEYEV, E.V. BARSHAK, D.V. VIKULIN,
B.P. LAPIN, M.A. YAVORSKY

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE DISPERSION OF HIGHER ORDER MODES OF THE GRADED-INDEX OPTICAL FIBERS

It was investigated the problem of the mode dispersion of optical vortices - higher order modes of circular optical fibers with infinite parabolic graded-index profile. It was established that there are both standard polarization and new topological mode dispersion between optical vortices. The dependence of the dispersion of optical vortices on the wavelength was numerically obtained and analyzed.

Особое значение оптических вихрей (ОВ) в информационных технологиях обусловлено их способностью переносить орбитальный угловой момент (ОУМ) [1]. Однако, на пути реализации информационных ОУМ-технологий, неотъемлемо возникает задача оценки и подавления дисперсии, образующейся вследствие различия скоростей ОВ, что приводит к снижению пропускной способности канала связи [2]. Поскольку ОВ обладают поляризационными и орбитальными степенями свободы, это может привести к возникновению, как известной для фундаментальных мод поляризационной модовой дисперсии (ПМД), так и новых типов модовой дисперсии. Таким образом, целью данной работы является исследование возможных типов дисперсии ОВ – мод высших порядков циркулярных оптических волокон с бесконечным параболическим профилем показателя преломления.

Показатель преломления исследуемых волокон имеет вид: $n(r) = n_c \sqrt{1 - 2\Delta R^2}$, где n_c – показатель преломления сердцевинки, $R = r/r_0$, r_0 – радиус сердцевинки, $\Delta \ll 1$ – высота профиля, используются цилиндрические координаты (r, φ, z) . Моды с азимутальным числом $|\ell| \geq 1$ представляют собой четыре ОВ [3]: $|1, |\ell\rangle$, $|-1, -|\ell\rangle$, $|1, -|\ell\rangle$, $|-1, |\ell\rangle$ [21]. Для ОВ $|\sigma, \ell\rangle$ $\sigma = \pm 1$ определяет направление циркулярной поляризации, ℓ – топологический заряд (ТЗ) ОВ. Соответствующие постоянные распространения имеют вид [2]: $\beta_{\sigma, \ell}(\lambda) = \tilde{\beta}_\ell(\lambda) + (\sigma\ell + 1)(2\Delta(\lambda))^{3/2} / 2r_0 V(\lambda)$, где $\tilde{\beta}_\ell(\lambda)$ – скалярная постоянная распространения, $V(\lambda)$ – волноводный параметр, λ – длина волны. Анализ показывает, что внутри группы мод с фиксированным $|\ell|$ помимо ПМД, возникающей между ОВ с одинаковым ТЗ и разной циркулярной поляризацией, существует принципиально новый вид дисперсии – топологическая модовая дисперсия (ТМД) – между ОВ с одинаковой поляризацией, но разным знаком ТЗ. При этом абсолютные значения ПМД и ТМД оказываются равны: $\Delta\tau = \left(-2\pi\sigma|\ell|z/r_0^2 k(\lambda)^2 c\right) \left(d\Delta(\lambda)/d\lambda \tilde{\beta}_\ell(\lambda)\right)$, где c – скорость света в вакууме, $k = 2\pi/\lambda$. Дисперсия между ОВ с разными знаками ТЗ и поляризации оказывается равной нулю. На рис. 1 приведены графики численно полученных зависимостей ПМД и ТМД от длины волны для различных составов сердцевинки волокна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-42-92014.

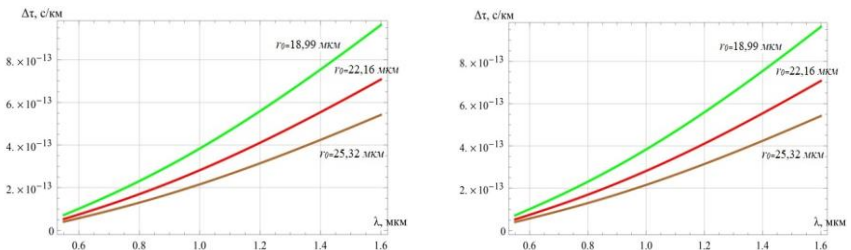


Рис. 1. Зависимость ПМД и ТМД ОВ с азимутальным числом $|\ell| = 2$, составы сердцевинки: 3,1% $\text{GeO}_2/96,9\% \text{SiO}_2$ и 2,2% GeO_2 , 3,3%/ $\text{B}_2\text{O}_3/94,5\% \text{SiO}_2$

Список литературы

1. Padgett M.J. // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 11265-11274.
2. Снайдер А., Лав Дж. М.: Радио и связь, 1987.
3. Alexeyev C.N., et. al. // Nova Publishers, New York, 2007.P. 131-223.

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

РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА ПРЕДАВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Рассмотрены вопросы ранней диагностики оптических волокон. Приведены примеры бриллюэновских рефлектограмм для предаварийного участка оптического кабеля. Результаты исследований подтвердили преимущество метода бриллюэновской рефлектометрии для ранней диагностики ВОЛС.

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

THE EARLY DIAGNOSTICS OF PRE-EMERGENCY SECTIONS IN OPTICAL FIBERS

The problems of early diagnostics of optical fibers are considered. Examples of Brillouin reflectograms for the pre-emergency section of the optical cable are given. The research results confirmed the advantage of Brillouin reflectometry method for early diagnosis of optical fibers.

С целью изучения особенностей рефлектограмм оптических волокон (ОВ) из проложенных оптических кабелей (ОК), находящихся под воздействием опасных факторов, были проведены экспериментальные исследования с помощью рефлектометров различных видов [1-4].

На рис. 1 представлена рефлектограмма BOTDR (бриллюэновского рефлектометра) с «проблемным» местом в ОВ, находящемся в проложенном ОК, участок которого на трассе прокладки оказался под воздействием сильной смещающей нагрузки. Место натяжения в ОВ хорошо заметно по смещению бриллюэновского сдвига частоты f_B с 10.84 ГГц в сторону увеличения (F2) на частоту 11.08 ГГц (f_{Bs}). На рис. 2 представлена соответствующая развернутая картина натяжения в ОВ. Как видно из графика, натяжение (strain) в месте механического воздействия на ОК увеличилось более, чем на 0.45 %, что является опасным для ОВ.

Проведенный анализ рефлектограмм предаварийных и потенциально «проблемных» участков показал, что BOTDR обнаружил такие участки ОВ заблаговременно до начала разрушения ОВ, чего не смог сделать OTDR (обычный импульсный рефлектометр). OTDR может обнаружить такие участки только при уже нарушенном оптическом пути [1-4].

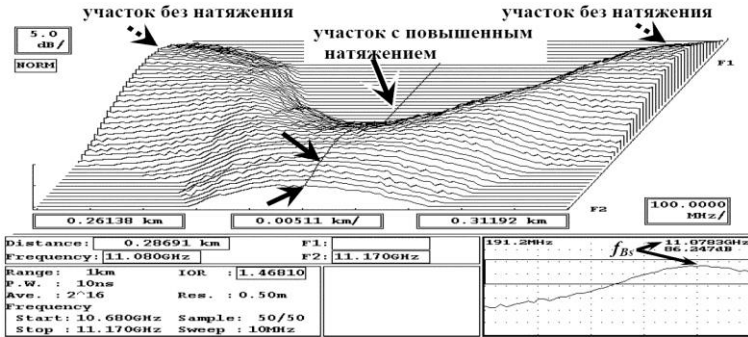


Рис. 1. Рефлектограмма BOTDR в области «проблемного» участка ОВ

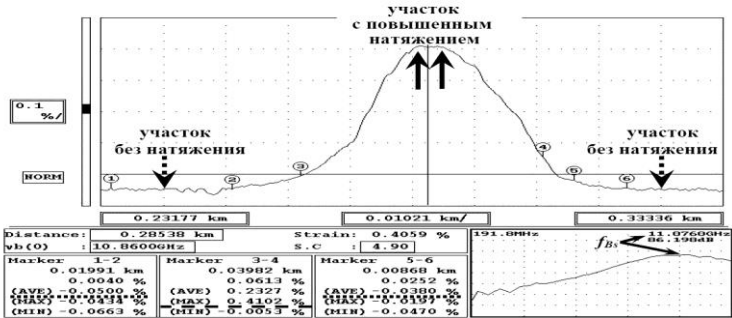


Рис. 2. Картина распределения натяжения вдоль ОВ

Таким образом, метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ОВ и устранять проблемы в ОВ на ранней стадии, что позволяет при устранении мешающих факторов вернуть ОВ в безопасное работоспособное состояние. Использование BOTDR повысит эффективность системы мониторинга ОВ [1-4].

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. 2017. Вып. 1 (37). С. 75-82.
2. Богачков И.В. // Динамика систем, механизмов и машин, 2018. Т. 6. № 4. С. 88-95.
3. Богачков И.В., Трухина А.И. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 1. С. 36-41.
4. Богачков И.В., Горлов Н.И. // Вестник СибГУТИ. 2018. Вып. 3 (43). С. 34-44.

Д.Р. ХАРАСОВ^{1,2}, Э.А. ФОМИРЯКОВ^{2,3}, Т.О. ЛУКАШОВА^{2,3}
*¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный
²ООО «Т8», Москва
³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ВКР-УСИЛИТЕЛЕМ

Исследовано увеличение дальности работы фазочувствительного когерентного рэлеевского рефлектометра (Ф-ОТДР) при использовании распределенного ВКР-усилителя в режиме усиления зондирующего импульса и сигнала обратного рассеяния, а также в режиме усиления только сигнала обратного рассеяния. Приведены результаты моделирования когерентной рефлектограммы при ВКР-усилении. Согласно им, показано, то при оптимизации формы импульса излучения ВКР-усилителя можно добиться увеличения дальности работы на 88 км.

D.R. KHARASOV^{1,2}, E.A. FOMIRYAKOV^{2,3}, T.O. LUKASHOVA^{2,3}
*¹Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny
²T8 Ltd, Moscow
³Lomonosov Moscow State University*

PHASE-SENSITIVE OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETER ASSISTED BY OPTIMIZED DISTRIBUTED RAMAN AMPLIFIER

The increase of the operating distance of a phase-sensitive optical time domain reflectometer (Ф-ОТДР) using a distributed Raman amplifier (RA) is investigated in two operation modes: the amplification of both the probe pulse and the backscattered signal, and the amplification of only the backscattered signal. The results of numerical simulations of the Ф-ОТДР trace under Raman amplification are presented. According to the simulations, it is shown that by optimizing the waveform of the Raman pump pulse the operating range of Ф-ОТДР could be increased by 88 km.

Дальность работы фазочувствительных когерентных рэлеевских рефлектометров (Ф-ОТДР) ограничено затуханием света в волокне. Один из способов увеличить дальность является использование распределённых усилителей на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [1]. При этом усиление сигнала происходит в самом волокне за счёт перекачки энергии излучения ВКР-усилителя (накачки) в стоксовую

компоненту на длине волны зондирующего излучения. При использовании непрерывной ВКР-накачки происходит усиление как зондирующего импульса, так и обратнорассеянного сигнала. Во избежание возникновения нелинейных эффектов на протяжении волокна входную мощность зондирующего импульса необходимо уменьшить [2]. Если же между зондирующим импульсом и импульсом ВКР-накачки существуют временная задержка (квазинепрерывная накачка), то усиление испытывает только обратнорассеянный сигнал. Так как мощность обратнорассеянного сигнала на много порядков меньше, чем мощность зондирующего, то при ВКР-усилении обратнорассеянного сигнала нелинейные эффекты не возникают. В таком случае необходимости в уменьшении мощности зондирующего импульса нет. В [3] автором данной работы показано, что при использовании прямоугольной квазинепрерывной накачки уровень рефлектограммы падает медленнее. Данный результат можно еще улучшить, используя трапециевидную форму импульса ВКР-накачки, вместо прямоугольной. На рис. 1 показаны результаты моделирования среднего уровня рефлектограммы [4] при квазинепрерывной ВКР-накачке на длине волны 1450 нм (стоксовский сдвиг ВКР – 13,2 ТГц): относительный уровень рефлектограммы остаётся на том же уровне вплоть до 70 км, а относительный уровень -20 дБ сдвигается на 88 км. Применение трапециевидной ВКР-накачки открывает возможность увеличить дальность работы фазочувствительных рефлектометров с нынешних 40-50 км до более 100 км.

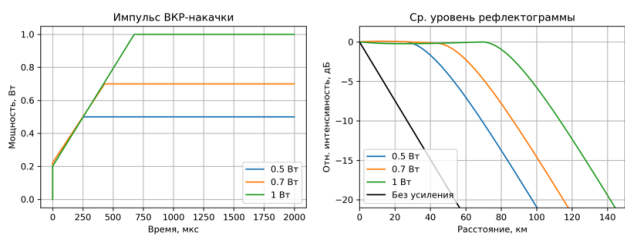


Рис. 1. Оптимальные формы импульса ВКР-накачки при разных мощностях ВКР-накачки (слева) и соответствующие им средние уровни рефлектограммы (справа)

Список литературы

1. Martins H.F. Distributed and remote fiber sensing assisted by Raman effect. 2014.
2. Kharasov D.R., et al. // 2018 ICLO – IEEE, 2018. С. 285.
3. Лукашова Т.О., et al. // V International Conference En&T 2018. Book of Abstracts.
4. Харасов Д.Р. // Труды 61-й Всероссийской научной конференции МФТИ. М.: МФТИ, 2017.

В.А. БУРДИН, А.В. БУРДИН

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара*

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОД LP_{01} И LP_{11} СТУПЕНЧАТОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Представлены аналитические решения для ступенчатого волоконного световода с керровской нелинейностью, описывающие дисперсионные характеристики мод LP_{01} и LP_{11} для одномодового и двумодового режимов распространения. Приведены результаты расчетов зависимостей дисперсионных характеристик данных мод от интенсивности оптического излучения в световоде для ряда примеров оптических волокон.

V.A. BURDIN, A.V. BOURDINE

Povolzhsky State University of Telecommunication and Informatics, Samara

DISPERSION CHARACTERISTICS OF LP_{01} AND LP_{11} MODES OF STEP-INDEX OPTICAL FIBER WITH KERR NONLINEARITY

Analytical solutions for a step-index optical fiber with a Kerr nonlinearity describing the dispersion characteristics of the LP_{01} and LP_{11} modes for single-mode and two-mode propagation are presented. For a number of examples of optical fibers the results of calculations of the dependencies of the dispersion characteristics of these modes on the optical intensity in a lightguide are presented.

Прогресс в области мощных фемтосекундных волоконных лазеров делает актуальной задачу исследования влияния факторов нелинейности на параметры мод волоконных световодов. В представленной работе рассмотрены зависимости от нелинейности дисперсионных характеристик мод LP_{01} и LP_{11} ступенчатых оптических волокон. Представлены полученные с учетом эффекта Керра на основе метода приближения Гаусса [1-3] аналитические решения для случаев одномодового режима (распространение только одной моды – LP_{01} или LP_{11}) и режима совместного распространения мод LP_{01} и LP_{11} . Предполагалось, что профиль показателя преломления описывается формулой [4]:

$$n_N(r) = n_S(r) + n_2 \cdot I(r)$$

где $n_S(r)$ – профиль показателя преломления без учета нелинейности; n_2 – параметр керровской нелинейности; r – радиальная координата;

$I(r)$ – распределение интенсивности оптического излучения вдоль радиуса волокна, которую определяли как:

$$I(r) = \frac{P_m}{\pi a^2} \cdot [F_m^{(l)}(x)]^2, \quad x = (r/r_0)^2.$$

Здесь P_m – пиковая оптическая мощность; a – радиус сердцевинки; r_0 – эквивалентный радиус пятна моды; $F_m^{(l)}(x)$ – функция радиального распределения поля моды Гаусса-Лагерра азимутального порядка l и радиального порядка m в оптическом волокне.

При выводе выражений для постоянных распространения мод воспользовались общей формулой для моды произвольного порядка волоконного световода с профилем произвольной формы [3]:

$$\beta^2 = \int_0^\infty k^2 n^2(x) [F_m^{(l)}(x)]^2 dx - \frac{c_{lm}}{a^2 R^2}$$

Были получены характеристические уравнения относительно эквивалентного радиуса пятна моды, а в случае двумодового режима распространения - система уравнений, выведены аналитические формулы для постоянных распространения мод и их первой, второй и третьей производных по длине волны, что позволило получить выражения для времени распространения и хроматической дисперсии мод первого и второго порядков. Получены зависимости дисперсионных параметров мод от интенсивности оптического излучения. На рис. 1 и 2 приведены зависимости хроматической дисперсии мод LP_{01} и LP_{11} , соответственно, в одномодовом режиме передачи.

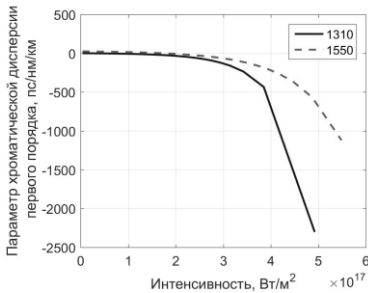


Рис. 1. Зависимость хроматической дисперсии моды LP_{01} от интенсивности

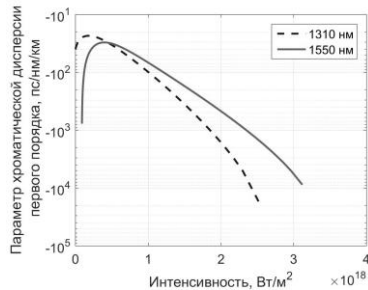


Рис. 2. Зависимость хроматической дисперсии моды LP_{11} от интенсивности

Список литературы

1. Snyder A.W. // Proc. of IEEE. 1981. V. 69 (1). P. 6-13.
2. Love J.D., Hussey C.D. // Optical and Quantum Electronics. 1984. V. 16(1). P. 41-48.
3. Burdin V.A., Bourdine A.V. // Proc. SPIE. 2017. V. 10342. P. 10342-0N.
4. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Academic Press, 2001.

О.Г. МОРОЗОВ, А.А. КУЗНЕЦОВ, И.И. НУРЕЕВ,
А.Ж. САХАБУТДИНОВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ РЕШЕТКИ С ЕДИНОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ БРЭГГА

Приведены результаты моделирования, записи и исследования спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами. Показана возможность создания на их основе многоточечных и квази-распределенных волоконно-оптических сенсорных сетей с малой стоимостью одного измерительного канала. При этом решетки имеют единую длину волны Брэгга, а адрес каждой из них определяется различной шириной спектрального разнеса между фазовыми сдвигами. Для извлечения измерительной информации необходимо простое оптико-электронное преобразование без использования сложных спектральных или интерференционных интеррогаторов.

O.G. MOROZOV, A.A. KUZNETSOV, I.I. NUREEV,
A.J. SAKHABUTDINOV

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

ADDRESS FIBER GRATINGS WITH A COMMON BRAGG WAVELENGTH

The results of modeling, recording, and investigation of the spectral characteristics of fiber Bragg gratings with two symmetric phase π -shifts are presented. The possibility of creating multi-point and quasi-distributed fiber-optic sensor networks with a low cost of one measuring channel is shown on their basis. In this case, the gratings have a single Bragg wavelength, and the address of each of them is determined by the different widths of the spectral separation between the phase shifts. To extract the measurement information, a simple optoelectronic conversion is necessary without using complex spectral or interference interrogators.

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) являются мощным инструментом для построения сенсоров различного назначения. Однако при объединении их в многоточечные или квази-распределенные сети возникает проблема дорогого канала измерений или сверхсложного, в основном, лабораторного построения устройств сбора информации с решеток – интеррогаторов. Интеррогаторы строятся на основе

спектрометрических схем при использовании решеток с различными брэгговскими длинами волн [1], или интерферометрических – при одинаковой брэгговской длине волны [2].

Первой целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование спектральных характеристик ВБР с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами и их изменений под воздействием различных физических полей. Второй целью работы является анализ возможности формирования адреса для различных решеток, имеющих одинаковую брэгговскую длину волны, в виде варьируемая ширины разноса между окнами прозрачности решетки, определяемой положением фазовых сдвигов по длине ВБР.

На рис. 1 представлены смоделированные нами трансформации спектра ВБР с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами при изменении длины решетки: 5 мм (а), 6 мм (б), 7 мм (в), 8 мм (д). На рис. 2 показан радиочастотный отклик от трех решеток с различным спектральным разносом между фазовыми сдвигами, записанных нами непрерывным лазером по технологии формирования составных решеток [3] в лаборатории НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ. Все решетки находились в одинаковых внешних условиях: температуре и давлении.

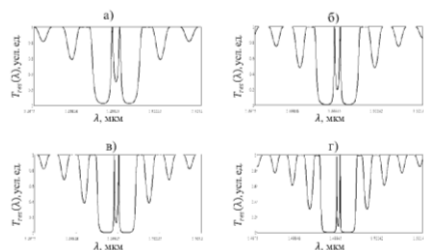


Рис. 1. Трансформация спектра ВБР при изменении длины решетки

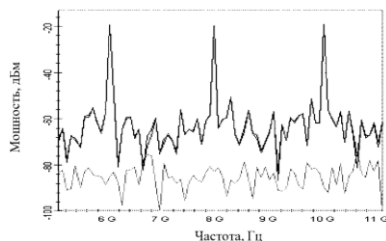


Рис. 2. Отклик трех ВБР с различным разносом фазовых сдвигов

Для получения отклика, показанного на рис. 2 нами были использованы: склон опорной ВБР, соответствующий диапазону измерений, фотоприемник с шириной полосы 20 ГГц и программное обеспечение на базе быстрого преобразования Фурье. Построенные на базе указанных решеток сенсорные сети не требуют использования спектральных или интерферометрических интеррогаторов.

Список литературы

1. García I., Zubia J., Durana G., et al. // Sensors. 2015. V. 15. P. 15494-15519.
2. Ye F., Qian L., Liu Y., et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2008. V. 20. P. 1488-1490.
3. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. // Proc. SPIE. 2009. V. 7503. P. 750309.

П.А. ЧАЙМАРДАНОВ

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

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО 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. CHAIMARDANOV

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR SIMULATION 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 широкое использование ВОСП как на транспортных сетях, так и на сетях доступа.

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 ВОСП могут быть использованы известные специализированные программные продукты, такие как Optiwave OptiSystem, RSoft OptSim, VIPhotonics VPITransmissionMaker и другие. При анализе возможностей и особенностей данных продуктов, а также опыта их использования в

отечественных компаниях телекоммуникационной отрасли (ООО Т8, АО НТЦ ВСП «Супертел ДАЛС»), были выявлены основные недостатки данных продуктов: 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 нового 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 оптических сигналов в пассивных компонентах, телекоммуникационных волокнах, усилителях EDFA и ВКР-усилителях.

- импортировать исходные данные и экспортировать результаты моделирования, в том числе в виде полноценного отчета.

- работать с компонентной базой, используемой на конкретном предприятии (при подключении к базе данных предприятия).

- 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, 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.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ С НАГРЕТЫМИ УЧАСТКАМИ

Приведены бриллюэновские рефлектограммы для оптических волокон различных видов при наличии в них нагретых участков. Проведён анализ изменений спектра рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и натяжения оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

RESEARCH BRILLOUIN REFLECTOGRAMS OF OPTICAL FIBERS OF DIFFERENT TYPES WITH HEATED SECTIONS

Brillouin reflectograms for optical fibers of different types with heated places are presented. The spectrum changes of the Mandelstam-Brillouin backscatter and tension of optical fibers is analyzed.

Важной задачей ранней диагностики оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК), является получение достоверной информации о физическом состоянии ОВ [1, 2]. Температурные изменения в ОВ могут сигнализировать о появлении «проблемного» участка на трассе прокладки ОК. Например, повышение температуры участка ОВ может наблюдаться при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК, а в зимнее время может наблюдаться понижение температуры участка ОВ при появления каких-либо разрушений на трассе прокладки ОК. Своевременное обнаружение такого участка позволяет принять необходимые меры по устранению аварии до разрушения ВОЛС. Для обнаружения участков ОВ с изменённой температурой применяют методы бриллюэновской (BOTDR) или рамановской рефлектометрии.

На рис. 1 представлена BOTDR-рефлектограмма световода, составленного из ОВ фирмы “Corning”: ОВ-G.652 (нормализующая катушка) +LBL+LEAF+ULTRA+EDF, различные участки которого были нагреты до +90 °С (сплошные стрелки), места стыков (штриховые стрелки) и части световода вне камеры нагрева имели температуру +25 °С. Нагретые участки хорошо заметно по смещению бриллюэновского сдвига частоты f_B

в сторону увеличения (F2) частоты. На рис. 2 представлена соответствующая картина натяжения в ОВ. Значения натяжение (strain) при разных температурах отмечены около штриховой линии.

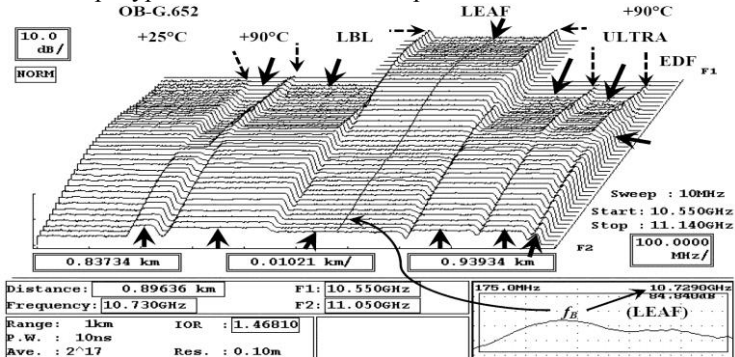


Рис. 1. BOTDR-рефлектограмма световода G.652+LBL+LEAF+ULTRA+EDF

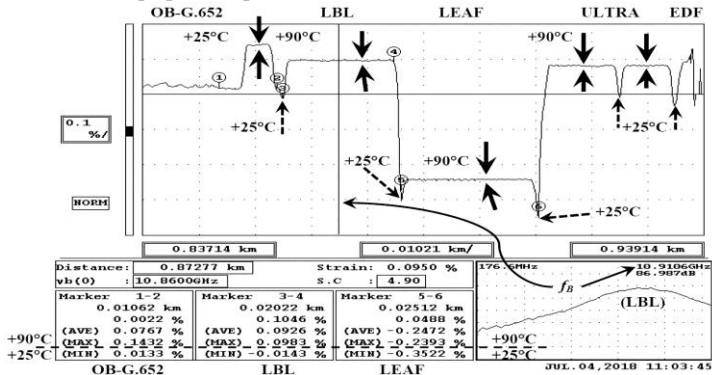


Рис. 2. Картина натяжения вдоль световода G.652+LBL+LEAF+ULTRA+EDF

Таким образом, BOTDR позволяет осуществлять раннюю диагностику ОВ и устранять проблемы в ОВ на ранней стадии. Использование BOTDR повышает эффективность систем мониторинга ОВ [1, 2].

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. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2017. Т. 8. № 1. С. 8-11.

А.А. МАКОВЕЦКИЙ, А.А. ЗАМЯТИН, Д.В. РЯХОВСКИЙ
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОМОДОВОГО КВАРЦЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С РАССЕИВАЮЩЕЙ СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ

Исследованы оптические свойства оптического волокна с кварцевой световедущей сердцевиной и светоотражающей оболочкой из термопластичного полимера марки Tefzel. Установлено, что при распространении света по волокну наблюдается заметное его рассеяние отражающей оболочкой, что связано с кристаллическостью полимера. Определены относительные вклады рассеяния и поглощения света в оболочке в общие оптические потери волокна.

А.А. MAKOVETSKII, А.А. ZAMYATIN, D.V. RYAKHOVSKIY
Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

OPTICAL PROPERTIES OF MULTIMODE SILICA OPTICAL FIBRE WITH THE SCATTERING REFLECTING COVER

Optical properties of optical fiber with a silica core and the reflecting cover from thermoplastic polymer of the Tefzel brand are investigated. At distribution of light on fiber his noticeable light scattering by the reflecting cover is observed. It is connected with crystallinity of polymer. Relative deposits of scattering and absorption of light in a cover in the general optical losses of fiber are defined.

Многомодовые оптические волокна (ОВ) со световедущей сердцевиной из чистого кварцевого стекла диаметром 200-600 мкм и светоотражающей оболочкой из кремнийорганического полимера широко используются в лазерной медицине [1]. Поверх отражающей оболочки на волокно наносят защитное покрытие, как правило, из термопластичного полимера.

Разработанный нами фильерный способ нанесения покрытий из расплавов термопластичных полимеров позволяет наносить покрытия на вытягиваемое “голое” (без буферного слоя) кварцевое волокно непосредственно во время вытяжки [2]. Если в качестве термопласта использовать фторированные термопластичные полимеры (т. е. полимеры с высоким содержанием фтора), имеющие показатель преломления меньший, чем у кварцевого стекла, то указанным способом можно

изготовить многомодовые кварц-полимерные ОВ, в которых отражающая оболочка одновременно является и защитной.

Целью данной работы является исследование оптических свойств одного из представителей таких ОВ – кварц-полимерного оптического волокна с отражающей оболочкой из сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки Tefzel.

Для исследований были изготовлены образцы ОВ с диаметром световедущей сердцевинки 400 мкм, толщиной отражающей оболочки 70 мкм, длиной до 50 м. Оптические потери в них составили 75-150 дБ/км (спектральный диапазон 600-1100 нм), числовая апертура – от 0.425 до 0.25 (в зависимости от длины ОВ).

При распространении света по исследованным ОВ наблюдалось сильное его рассеяние оболочкой Tefzel, видимое под любым углом наблюдения к оси ОВ. Оно связано с кристаллическостью полимера, то есть наличием в материале кристаллической и аморфной фаз, имеющих различные значения показателя преломления.

На рис. 1 приведены схема измерения индикатрисы рассеянного отрезком оболочки ОВ длиной 10 мм света ($\lambda = 0.63$ мкм) и результат измерений.

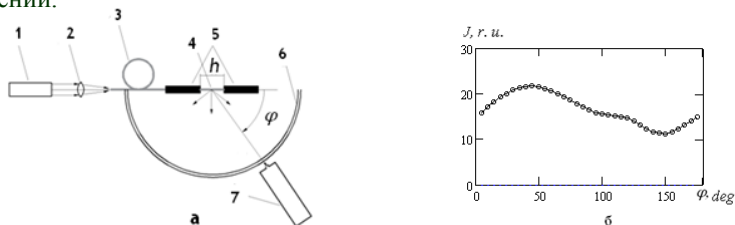


Рис. 1. Схема измерения индикатрисы рассеяния: 1 - He-Ne-лазер, 2 - фокусирующая линза, 3 - исследуемое ОВ, 4 - открытый отрезок ОВ длиной 10 мм, 5 - экранирующие трубочки на ОВ, 6 - гониометр, 7 - ФЭУ-51 (а); измеренная индикатриса рассеяния (б)

Несмотря на наличие дополнительных оптических потерь за счет рассеяния света отражающей оболочкой, образцы исследованных ОВ длиной 3-5 м пригодны к использованию в лазерной медицине.

Список литературы

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М: Физматлит, 2010.
2. Замятин А.А., Иванов Г.А., Маковецкий А.А., Шилов И.П. // Патент РФ № 2402497. 2010.

М.С. БЫЛИНА, С.Ф. ГЛАГОЛЕВ, С.Э. ДОЦЕНКО

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

ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КВАЗИСОЛИТОННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Проведены расчеты и выполнено моделирование солитонных волоконно-оптических систем связи, в которых поддержание квазисолитонного режима передачи сигналов реализуется методом управления потерями. Рассмотрены два способа управления потерями с помощью дискретных и распределенных оптических усилителей. Показаны преимущества распределенного усиления.

M.S. BYLINA, S.F. GLAGOLEV, S.E. DOTSENKO

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

IMPLEMENTATION OF QUASISOLITON FIBER OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

Calculations were carried out and soliton fiber-optic communication systems were simulated, in which the maintenance of the quasi-soliton mode of signal transmission is realized by the loss control method. Two ways to control losses using discrete and distributed optical amplifiers are considered. The advantages of using distributed gain are shown.

Волоконно-оптическая система связи (ВОСС) большой протяженности обычно состоит из усилительных участков (УУ). Каждый усилительный пункт обеспечивает компенсацию затухания и хроматической дисперсии (ХД) в телекоммуникационном оптическом волокне (ОВ). В ОВ с отрицательным значением дисперсии групповых скоростей (ДГС) β_2 искажения сигналов с амплитудной двоичной модуляцией и бинарным кодированием с возвращением к 0 (RZ), обусловленные ХД, можно компенсировать за счет фазовой самомодуляции (ФСМ), которая возникает в ОВ при больших мощностях сигналов.

Исследование решений нелинейного уравнения Шредингера, описывающего процессы распространения оптических импульсов (ОИ) по ОВ без потерь, предсказывает возможность существования солитонов – ОИ определенной формы и длительности $2T_0$, которые не искажаются (фундаментальный солитон, ФС) или периодически изменяют свою форму, возвращаясь к исходной (солитоны высших порядков), при распространении в ОВ вдоль оси Z .

ФС возникает в ОВ при условии $L_D = L_{NL} = 1/(\gamma P_{0e})$, имеет огибающую в форме гиперболического секанса [1-3] и его распространение вдоль оси Z по ОВ без потерь описывается функцией

$$u(z, \tau) = \text{sech}(\tau) \cdot \exp(i \cdot z / 2), \quad z = Z / L_D, \quad \tau = T / T_0, \quad L_D = T_0^2 / |\beta_2|, \quad (1)$$

где z, τ – нормированные расстояние и время, L_D – дисперсионная длина ОВ, P_{0e} – пиковая мощность импульса на входе в ОВ, i – мнимая единица, γ – коэффициент нелинейности. В процессе распространения солитона в ОВ с коэффициентом затухания α его энергия уменьшается и солитон разрушается, преобразуясь в обычный импульс, подверженный искажениям из-за ХД. ВОСС, в которых энергия солитонов поддерживается с помощью ОУ, называют солитонными системами с управлением потерями. Возможны два способа поддержания солитонного режима, которые реализуются установкой дискретных ОУ через некоторое расстояние Z_A или использованием распределенного усиления в ОВ, например, на основе рассеяния Рамана. При этом источники

накачки устанавливаются через расстояние Z_A [2, 3].

В работе было проведено моделирование квазисолитонных ВОСС со скоростью 10 Гбит/с в ОВ DSF с распределенным и дискретным усилением. На рис. 1 показаны нормированные зависимости пиковой мощности P_0 вдоль ОВ при $Z_A = 40$ км. Изменения пиковой мощности на УУ не превышают 50 % при встречной и 10 % при двунаправленной накачке. Для сравнения показано изменение пиковой мощности при

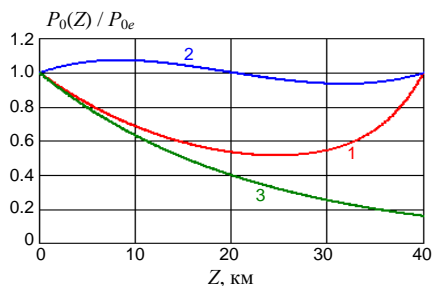


Рис. 1. Нормированные изменения пиковой мощности в пределах УУ: 1 - распределенный ОУ со встречной накачкой, 2 - распределенный ОУ с двунаправленной накачкой, 3 - дискретный ОУ

использовании дискретных ОУ, которое показывает преимущество солитонных ВОСС с распределенным управлением потерями.

Список литературы

1. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM – системы. М.: Техносфера, 2017.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.
3. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. М.: Физматлит, 2005.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ

*Ульяновский государственный университет***МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СВЕТОВОДАХ**

Исследовалась генерация последовательностей ультракоротких импульсов из квазинепрерывной модулированной волны, которая происходит в результате индуцированной модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейных волоконных световодах с различными профилями зависимостей дисперсии от длины.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV

*Ulyanovsk State University***MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS THROUGH A INHOMOGENEOUS FIBER**

The conditions of occurrence, the region of existence, and other characteristics of the modulation instability of wave packets propagating in a nonlinear medium with a running refractive index wave are researched.

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2, 3]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\gamma |A|^2 A = 0, \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, γ – параметр нелинейности.

На рис. 1 приводятся зависимости максимума модулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)], \quad (2)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров: начальной мощности $P_0 = 1$ Вт, длине световода $L = 1000$ м, начальной ДГС $d_{20} = -10^{-26}$ с²/м, дисперсии на длине L $d_2(L) = 0.1 \cdot d_{20}$, параметре нелинейности $\gamma = 10^{-2}$ (Вт·м)⁻¹ и частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|}$ при зависимостях дисперсии

$$d_2(z)/d_{20} = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_n z)^{-1}; \exp(-b_g z^2); (1 - b_p z^2)^2 - \text{кривые (1;2;3;4;5)}$$

(1;2;3;4;5). Из зависимостей на рис. 1 видно, что наибольшие степени сжатия генерируемых импульсов достигаются при плавно убывающих по модулю зависимостях дисперсии: линейной, гауссовой и параболической. При этом почти на всей длине световода максимальная степень сжатия возникает при гауссовом профиле дисперсии, уступая параболическому профилю лишь на выходе из световода, когда при таком профиле происходит резкий рост пиковой мощности.

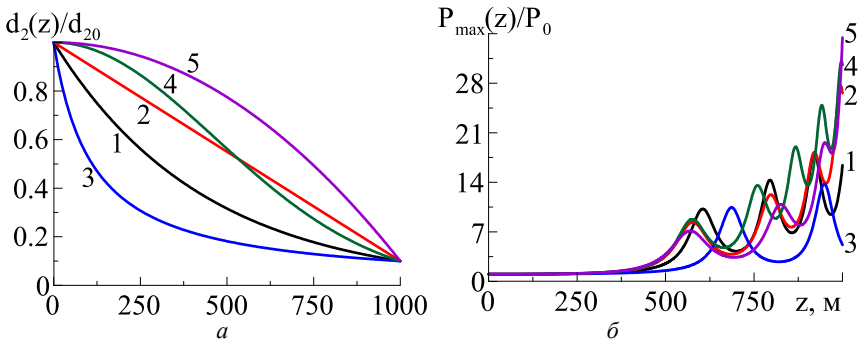


Рис. 1. Нормированные продольные зависимости дисперсии (а) и максимума модулированной волны (б), для зависимостей дисперсии:

$$d_2(z)/d_{20} = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_n z)^{-1}; \exp(-b_g z^2); (1 - b_p z^2) - \text{кривые (1;2;3;4;5)}$$

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00957.

Список литературы

1. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Springer, 2007.
2. Ахметшин У.Г., Богатырев В.А., Сенаторов А.К., Сысолятин А.А., Шалыгин М.Г. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 3. С. 265-267.
3. Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S.V. // Opt. Commun. 2018. V. 426. P. 333-340.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

УГЛОВАЯ РАСХОДИМОСТЬ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНОГО ПУЧКА СВЕТА

Исследовано влияние степени пространственной когерентности пучка излучения на его угловую расходимость. Определены условия, при которых естественная угловая расходимость становится больше дифракционной расходимости пучка света.

N.I. PETROV

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

ANGULAR DIVERGENCE OF PARTIALLY-COHERENT LIGHT BEAMS

The influence of the degree of spatial coherence of the radiation beam on its angular divergence is investigated. The conditions under which the natural angular divergence becomes greater than the diffraction divergence of the light beam are determined.

При распространении когерентного пучка излучения в однородной среде происходит его расплывание из-за дифракции и наличия кривизны волнового фронта. На поперечные размеры пучка влияет также естественная угловая расходимость, связанная с пространственной когерентностью. Известно, что естественная угловая расходимость, обусловленная спонтанным излучением атомов в резонаторе, существенно меньше дифракционной расходимости лазерных пучков [1]. В случае частично-когерентного излучения влияние степени когерентности на расходимость пучка становится значительным [2, 3].

В настоящей работе показано, что в случае частично-когерентного пучка излучения кроме дифракционной и геометрической расходимости необходимо учитывать также естественную угловую расходимость. На примере непараксиального распространения света в градиентной среде показано, что размер пятна фокусировки зависит от радиуса когерентности падающего частично-когерентного пучка.

Угловая расходимость частично-когерентного пучка излучения в модели Шелла-Гаусса может быть выражена в следующем виде

$$(\Delta\theta)^2 = \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{a_0^2} + \frac{2}{r_0^2} + \frac{k^2 a_0^2}{4R_f^2} \right), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, a_0 – радиус пучка, r_0 – радиус когерентности, R_f – радиус кривизны волнового фронта.

Отсюда следует, что угловая расходимость определяется начальной шириной пучка, радиусом когерентности и радиусом кривизны волнового фронта. На рис. 1 представлены зависимости угла расходимости от ширины пучка для различных значений радиуса когерентности при длине волны излучения $\lambda = 0.63$ мкм и $R_f = \infty$. На рис. 2 показано изменение ширины частично-когерентного пучка излучения при распространении в градиентном волноводе с квадратичным профилем показателя преломления для различных значений радиуса когерентности. Известно, что в такой среде дифракционная расходимость когерентного пучка излучения компенсируется фокусирующей силой градиентной среды. Однако при уменьшении радиуса когерентности ширина пятна фокусировки уменьшается вследствие влияния естественной угловой расходимости. При $r_0 < a_0$ естественная угловая расходимость превосходит дифракционную.

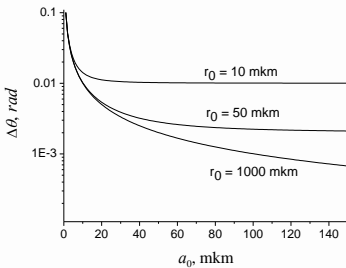


Рис. 1. Зависимость угла расходимости от радиуса пучка света

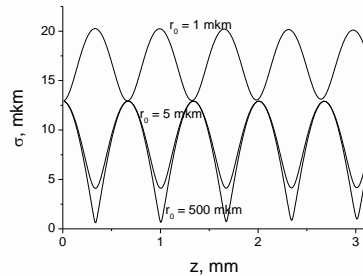


Рис. 2. Изменение ширины пучка с расстоянием в градиентном волноводе

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

Список литературы

1. Чиркин А.С. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. С. 352.
2. Krivoslykov S.G., Petrov N.I., Sissakian I.N. // Opt. & Quant. Electr. 1986. V. 18. P. 253.
3. Petrov N.I., Petrova G.N. // Optics Express. 2017. V. 25. P. 22545.

Б.В. СОКОЛЕНКО, Н.В. ШОСТКА, О.С. КАРАКЧИЕВА,
Д.А. ПОЛЕТАЕВ, С.И. ХАЛИЛОВ

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ЭВОЛЮЦИЯ ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ ПРИ ТРЕХЛУЧЕВОЙ ВНЕОСЕВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ ПУЧКОВ

Приведены результаты моделирования и эксперимента по формированию пространственных распределений сложных периодических структур с сингулярностью волнового фронта при помощи внеосевой интерференции трех когерентных пучков. Определены условия генерации оптических вихрей в зависимости от интенсивности парциальных пучков, их перетяжки и угла наклона.

B.V. SOKOLENKO, N.V. SHOSTKA, O.S. KARAKCHIEVA,
D.A. POLETAEV, S.I. HALILOV

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

EVOLUTION OF PHASE SINGULARS AT THREE-BEAM OFF-AXIS INTERFERENCE OF COHERENT LIGHT

The results of modeling and experiment on the formation of spatial distributions of complex periodic structures with the singularity of the wave front using the off-axis interference of three coherent beams were presented. The conditions for the generation of optical vortices are determined depending on the intensity of the partial beams, their waist radii and the inclination angle.

Формирование двух- и трехмерных световых структурированных полей с помощью интерференции нескольких когерентных пучков является актуальной задачей микролитографии и микроскопии [1, 2]. С помощью данного метода становится возможным создание множества конфигураций периодических распределений оптической интенсивности в микро- и нано- масштабе на большой длине, площади и в объеме [3, 4]. Целью работы является разработка параметрической модели и её экспериментальное исследование особенностей формирования поля при трехлучевой интерференции когерентных пучков в оптических ловушках.

Выражение для амплитуды и фазы Гауссового пучка имеет вид:

$$E(r, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(\frac{-r^2}{\omega(z)^2}\right) \exp\left(-i\left(kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - \phi(z)\right)\right),$$

где r – радиальная координата, z – осевое расстояние от фокуса луча, k – волновое число, $\omega(z)$ – длина Рэлея, ω_0 – радиус перетяжки, $R(z)$ – радиус кривизны волновых фронтов пучка в точке z и $\psi(z)$ – начальная фаза.

Интенсивность поля в каждой точке изображения определена как квадрат суммы всех интерферирующих пучков: $I = (E_1 + E_2 + E_3)^2$. Метод трехлучевой интерференции (рис. 1) позволяет воспроизводить картину минимумов и максимумов, локализованных в области, геометрически значительно меньшей, чем определяемый дифракционным пределом оптической системы. Особое внимание при этом уделяется формированию фазовых сингулярностей – оптических вихрей и их дипольных пар (рис. 2), обладающих локальным орбитальным угловым моментом, нашедших свое применение в оптических ловушках с помощью вихревых массивов.

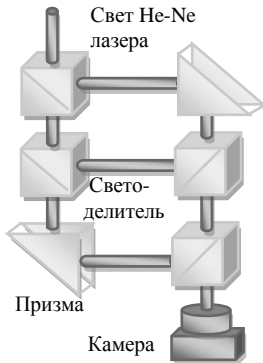


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

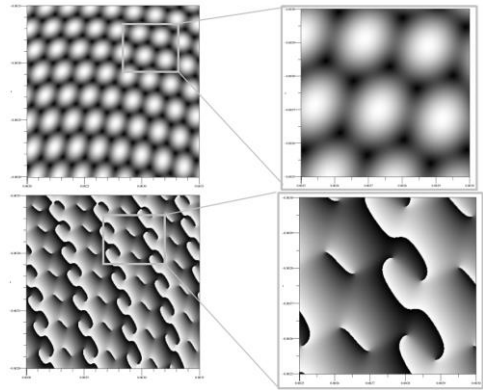


Рис. 2. Трехлучевая интерференция: распределение интенсивности (верхний ряд) и фазовый портрет (нижний ряд)

Список литературы

1. Masajada J., Popiolek-Masajada A., et. al. // Opt. Express. 2007. V. 15 (8). P. 5196-5207.
2. Rego E.H., Shao L., et. al. // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2012. V. 109(3). P. E135-E143.
3. Kurzynowski P., Czek E.F. // Appl. Opt. 2006. V. 45(30). P. 7898.
4. Kurzynowski P., Woźniak W.A., et. al. // Optical Society of America. 2012. V. 20 (24). P. 26755.

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.*

УСЛОВИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АКУСТИЧЕСКОГО СНОСА В ПЛОСКОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Показано, что в плосковолновом приближении функция пропускания остается практически инвариантной при таком синхронном изменении угла акустического сноса в плоскости брэгговского АО-взаимодействия и ширины акустического столба, при котором не меняется расстояние, проходимое падающим лучом света в звуковом поле. Исключением является такая геометрия, когда падающая или дифрагированная световая волна пересекает звуковой столб почти касательно.

V.V. PROKLOV, Yu.G. REZVOV¹

*Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS
¹Novomoskovsk Institute of Mendeleev University of Chemical Technology, Tula region*

CONDITION FOR INVARIANCE OF ACOUSTOOPTICAL TRANSMISSION FUNCTION WHEN CHANGING ACOUSTIC DRIFT IN THE PLANE OF ACOUSTOOPTIC INTERACTION

It is shown that in the plane-wave approximation the transmission function remains practically invariant with such a synchronous change in the angle of acoustic drift in the plane of the Bragg AO interaction and the width of the acoustic column, which does not change the distance traveled by the incident light beam in the sound field. An exception is such a geometry when the incident or diffracted light wave crosses the sound pole almost tangentially.

Использование в акустооптике анизотропных сред расширяет возможности акустооптического (АО) взаимодействия. При этом приходится учитывать акустический снос – отклонение направления групповой скорости звука \mathbf{S} от волнового вектора \mathbf{K} . В частности, для медленной квазипоперечной моды в кристалле парателлурита (TeO_2) снос может составлять десятки градусов. Влияние сноса на характер АО взаимодействия остается предметом научного исследования (например

[1, 2]). Данная работа предлагает в плосковолновом приближении упрощение рассматриваемой проблемы. На рис. 1 представлена геометрия возможного варианта брэгговского АО взаимодействия в анизотропной среде. В пределах области взаимодействия оптическое поле образовано совокупностью двух плоских волн, относящихся к разным поляризационным модам: проходящей (« t ») и дифрагированной (« d »).

Анализ показывает, что результат АО взаимодействия практически не меняется при определенном условии. Оно заключается в таком синхронном изменении угла акустического сноса в плоскости АО дифракции и ширины акустического столба, при котором остается неизменным расстояние, проходимое падающим лучом света вдоль возмущенного слоя. На рис. 2 показаны варианты такого преобразования: "0" – нормальное падение на акустический столб, "1" – снос отсутствует, "2" – очень большой снос. Во всех случаях волновой вектор \mathbf{K} направлен по нормали к преобразователю, в отличие от групповых скоростей $\mathbf{S}_{0,2}$. Точность сформулированного утверждения падает, когда падающий или дифрагированный свет пересекают акустический столб почти касательно. Установленная инвариантность позволяет выбрать наиболее удобную форму слоя в том или ином случае [3, 4].

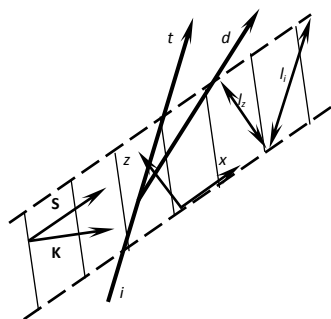


Рис. 1. Геометрия варианта АО взаимодействия

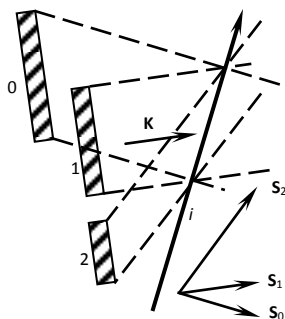


Рис. 2. Эквивалентные конфигурации акустического столба

Список литературы

1. Балакший В.И., Волошин А.С. // Изв. РАН. Серия физ. 2015. Т. 79. № 10. С. 1471-1475.
2. Балакший В.И., Волошин А.С., Молчанов В.Я. // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117. № 5. С. 827-832.
3. Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. № 1. С. 122-128.
4. Проклов В.В., Резвов Ю.Г., Подольский В.А. // Ак. журн. 2018. Т. 64. № 6. С. 669-675.

М.М. ВЕКШИН, В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОННОГО ОБМЕНА В СТЕКЛЕ К-8

Проведена реконструкция параметров процесса ионного обмена Ag^+-Na^+ в стекле К-8. Определены значения коэффициента самодиффузии ионов серебра, отношение коэффициентов самодиффузии ионов серебра и натрия и максимальное приращение показателя преломления на поверхности волновода

M.M. VEKSHIN, V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

THE RECONSTRUCTION OF PARAMETERS OF ION-EXCHANGE PROCESS IN GLASS K-8

The reconstruction of parameters of ion-exchange process Ag^+-Na^+ in glass K-8 has been made. The self-diffusion coefficient of silver ion, the ratio of self-diffusion coefficients of silver and sodium and the maximum refractive change at optical waveguide surface are determined.

Методы формирования оптических микроструктур в стекле путем ионного обмена обладают широкими возможностями для создания интегрально-оптических схем различного функционального назначения [1]. Для разработки и изготовления элементов интегральной оптики и микролинз путем различных вариантов ионного обмена в стекле необходима информация о распределения концентрации внедряемых ионов, как экспериментальная, так и полученная в результате физико-математического моделирования технологического процесса. В качестве внедряемых ионов наиболее часто используют ионы серебра, процесс ионного обмена происходит в смеси солей AgNO_3 и NaNO_3 .

Расчет концентрации ионов серебра в приповерхностном слое стекла возможен только при известных значениях коэффициента самодиффузии серебра D_{Ag} и отношения коэффициентов диффузии ионов серебра и натрия M . Переход от распределения концентрации ионов серебра к распределению показателя преломления волновода, что необходимо для расчета его оптических характеристик, требует знания приращения показателя преломления Δn на поверхности.

Цель работы состоит в разработке и применении методики одновременного определения параметров ионного обмена в стекле К-8 $\{D_{Ag}, M, \Delta n\}$ по измеренным значениям эффективных показателей преломления многомодовых планарных волноводов.

Методика была разработана на основе симплекс-метода многомерной оптимизации Нелдера-Милда с ограничениями на диапазон поиска и не предполагает какой-либо информации о виде профиля показателя преломления. Методика сводится к следующим действиям:

1. Вводятся начальные приближения для всех трех параметров $\{D_{Ag}, M, \Delta n\}$.

2. Определяется распределение концентрации ионов серебра по глубине стеклянной подложки путем решения нелинейного уравнения диффузии для планарного волновода.

3. Рассчитываются значения эффективных показателей преломления волноводных мод N_{eff} посредством решения волнового уравнения для напряженности электрического поля ТЕ-мод планарного волновода.

4. Полученные значения N_{eff} сопоставляются с набором измеренных значений эффективного показателя преломления n_{eff} волновода. Значения n_{eff} получены путем измерений углов призмного возбуждения мод изготовленного планарного многомодового волновода. Если они не согласуются с приемлемой степенью точности, формируется новый набор параметров $\{D_{Ag}, M, \Delta n\}$, исходя из значений предыдущих, и процесс повторяется, пока не достигается необходимая степень точности приближений расчетных значений N_{eff} к набору измеренных значений n_{eff} .

Для реконструкции параметров ионообменного процесса были использованы следующие технологические параметры изготовленных планарных волноводов в стекле К-8 в смешанном расплаве солей $AgNO_3$ и $NaNO_3$: молярное соотношение солей 1:10, температура ионного обмена 350 °С, время ионного обмена – 30, 60, 120 и 180 минут. Волноводы имели 5, 6, 9 и 10 мод на длине волны 0.63 мкм. Результаты реконструкции по различным образцам: значения $M = 0.02-0.03$; $\Delta n = 0.057 \div 0.06$; $D_{Ag} = 0.0006-0.0007$ мкм²/с.

Список литературы

1. Tervonen A., West B.R., Honkanen S. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review // Optical Engineering. 2011. V. 50. № 7. P. 071107-1÷071107-15.

С.Н. МОСЕНЦОВ, И.А. ОСЬМАКОВ¹

ООО «Би Питрон», Санкт-Петербург

¹ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА

На основе предшествующих работ была предложена идея квазираспределённой системы пожарного спектроанализатора. Цикл предшествующих научных исследований и подбора элементной базы позволил провести общее конструктивное 3D-моделирование фурье-процессора устройства.

S.N. MOSENTSOV, I.A. OSMAKOV¹

Bee Pitron Ltd, Saint-Petersburg

¹Burtsev laboratory Ltd, Saint-Petersburg

DESIGNING OF THE QUASI-DISTRIBUTED SPECTRUM ANALYZER

Based on previous works the idea of the quasi-distributed system fire spectrum analyzers was proposed. The cycle of previous researches and element base selection allowed to carry out the device's Fourier-processor constructive 3D-modeling.

Известно, что анализ распространения оптических сигналов в линзовых системах в рамках геометрической оптики имеет ряд недостатков [1]. Её принципы не учитывают дифракционную расходимость оптических пучков и формирование бесконечно большой плотности энергии в фокальных точках, что не адекватно реальной картине явления. Данные недостатки геометрической оптики не позволяют описать преобразование пространственного оптического сигнала оптической системой, что приводит к использованию методов волнового анализа распространения сигналов в оптических системах.

Как было показано в предшествующих работах, в которых производился анализ оптических фурье-систем [2], поле на выходе пространственного фурье-процессора – зеркальное отображение поля на его входе. Проведённый анализ привёл к созданию математического аппарата, учитывающего потери излучения в линзовых системах за счёт дифракционной расходимости. Аналитические расчёты и лабораторные эксперименты показали, что при некоторых конфигурациях системы энергетические потери вносят значительный вклад в затухание [3].

Данный факт нельзя игнорировать при проектировании изделий высокой точности, к которым относятся спектроанализаторы.

Целью работы является проектирование пожарного волоконно-оптического спектроанализатора продуктов горения. Моделирование осуществлялось в САПР Solid Edge, подбор элементной базы производился с ориентацией на российское производство оптических компонентов. Результат моделирования приведён на рис. 1. Также, основываясь на успешности предыдущих теоретических разработок [3], предложена схема квазираспределённого спектроанализатора (рис. 2). В данной схеме реализуется подача входного сигнала от одного источника, что при увеличении площади лоцируемого пространства позволяет упростить и удешевить пожарную оптическую систему.



Рис. 1. 3D-модель линзового элемента

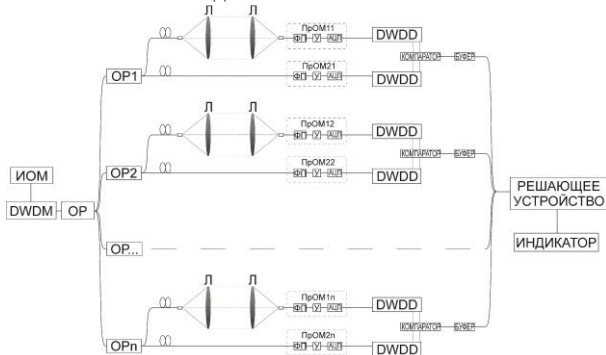


Рис. 2. Структурная схема извещателя

Список литературы

1. Mosentsov S.N., Kazakov V.I., Moskaletz O.D. Energy transfer in the optical system, includes a layer of free space and lenses // Proceedings of international conference WECONF 2015.
2. Mosentsov S.N., Kazakov V.I., Moskaletz O.D. Influence of aperture lens system on optical information processing // Proc. SPIE. 2015. V.9598. P. 959809.
3. Мосенцов С.Н., Москалец О.Д. Анализ распространения лазерного излучения в волоконно-оптическом взрывобезопасном пожарном извещателе // VII-я Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Тезисы докладов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2018.

И.В. ИЗМАЙЛОВ¹, Б.Н. ПОЙЗNER¹, Э.А. СОСНИН^{1,2}
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

ФОРМА ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЗАДАЁТ ВИД ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обсуждается система, чья передаточная характеристика низкочастотного нелинейного элемента воспроизводит форму высокочастотного сигнала: оптического, терагерцового и других. В оптоэлектронных устройствах, включая радиофотонные, реализуемых на базе этой системы, осуществимо дистанционное управление передаточной характеристикой, а также самоизменение её. Последнее может быть непредсказуемым для внешнего наблюдателя.

I. V. IZMAILOV¹, B. N. POIZNER¹, E. A. SOSNIN^{1,2}
¹National Research Tomsk State University
²Institute of High Current Electronic SB RAS, Tomsk

OPTICAL SIGNAL FORM SETS THE TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF THE LOW-FREQUENCY NONLINEAR ELEMENT

The system where transfer characteristic of a low-frequency nonlinear element reproduces the form of a high-frequency signal: optical, terahertz and others is discussed. Remote control of the transfer characteristic (and its self-change which can be unpredictable for an external observer) is feasible in optoelectronic devices including microwavephotonic based on this system.

Существует аксиоматика [1, 2], в рамках которой возможны всего четыре вида передаточных характеристик (ПХ). Первые три вида ПХ соответствуют преобразователю сигналов \mathbf{f} : 1) ПХ в пространстве форм сигналов; 2) ПХ в пространстве параметров $\Pi_{\mathbf{f}}$ сигналов; 3) ПХ $S_{\text{вых}} = N(S_{\text{вх}})$ в пространстве величин $S_{\text{вых}}$, $S_{\text{вх}}$ сигналов $f_{\text{вых}}$, $f_{\text{вх}}$. А ради общности целесообразно ввести четвёртую ПХ, считая, что её имеет сам сигнал \mathbf{f} : $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \Pi_{\mathbf{f}})$, т.е. $(\mathbf{x}, \Pi_{\mathbf{f}}) \rightarrow \mathbf{f}$, где \mathbf{x} – вектор пространства-времени.

В этом контексте нелинейность ПХ материальных объектов в пространстве величин их входных и выходных сигналов не появляется «из ниоткуда», а лишь трансформируется (переносится) из пространства форм более высокочастотных сигналов и/или из пространства их параметров.

Поэтому предлагаемый к обсуждению сюжет, когда форма оптического сигнала задаёт вид более низкочастотной ПХ $S_{\text{вых}} = N(S_{\text{вх}})$, принадлежит к бесконечному множеству закономерно устроенных нелинейных элементов.

Преимущества использования оптического диапазона при выборе высокочастотного управляющего сигнала состоят в том, что велик арсенал лазеров и широко стандартные средства управления такими параметрами, как амплитуда, фаза, частота излучения. Это позволяет сформировать электромагнитный (оптический) сигнал требуемой сложной формы, например, сложением должным образом фазированных и ослабленных гармоник одного или нескольких сигналов.

Такое использование оптического диапазона лежит в русле радиофотоники – актуального научно-технического направления, формирующегося сегодня как авангард оптоэлектроники. Хотя для ПХ $S_{\text{вых}} = N(S_{\text{вх}})$ мы употребили прилагательное «низкочастотная», нелинейные элементы предлагаемого класса способны работать в СВЧ-, КВЧ-, ТГц-диапазонах, например, в цепях управления.

Простейший вариант (рис. 1) подобного устройства восходит к интерферометру Маха-Цендера, в одно из плеч которого поставлен фазовый модулятор (ФМ), а на выходе присутствует фотоприёмник, несущий функции квадратора напряжённости электрического поля E^2 и фильтра нижних частот (ФНЧ). От источника оптического сигнала специальной формы (ИОССФ) излучение f_0 поступает на делитель, влияя своей специально заданной формой на вид ПХ $S_{\text{вых}} = N(S_{\text{вх}})$.

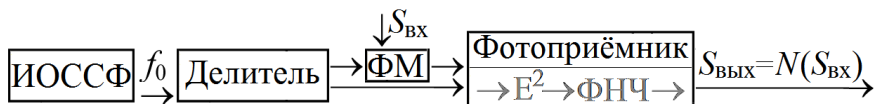


Рис. 1. Структура оптоэлектронного нелинейного элемента, чей вид низкочастотной передаточной характеристики $S_{\text{вых}} = N(S_{\text{вх}})$ зависит от формы оптического сигнала f_0

Список литературы

1. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Аксиоматическая схема исследования динамических систем: от критериев их разобщения к самоизменению. Томск: STT, 2011.
2. Izmailov I.V., Poizner B.N., Romanov I.V., Smolskiy S.M. Cryptology Transmitted Message Protection. From Deterministic Chaos up to Optical Vortices. Springer Int. Publ., 2016

Д.С. ЗЕМЦОВ^{1,2}, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ¹, В.А. НЕБАВСКИЙ¹,
Р.С. СТАРИКОВ¹, И.Ж. ХАФИЗОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Научно-технический центр «Модуль», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОФОТОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНОГО СОСТАВА ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОСИГНАЛА

В работе рассматривается возможность использования радиофотонного преобразователя частоты для оценки частотного состава широкополосного радиосигнала. Кроме того, описывается экспериментальная установка, а также применимость радиофотонного преобразователя частоты в задачах распознавания разреженных во временной области радиосигналов.

D.S. ZEMTSOV^{1,2}, E.Yu. ZLOKAZOV¹, V.A. NEBAVSKIY¹,
R.S. STARIKOV¹, I.Zh. KHAFIZOV^{1,2}

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

²Scientific and Technical Centre "Module", Moscow

USING THE MICROWAVE PHOTONIC DOWNCONVERTER FOR ESTIMATING THE FREQUENCY OF THE BROADBAND RADIO SIGNAL

The paper discusses the possibility of using a microwave photonic downconverter to estimate the frequency composition of a wideband radio signal. In addition, an experimental setup is described as well as the applicability of a microwave photonic downconverter for detecting sparse radio signals in the time domain.

Различные радиофотонные устройства становятся все более популярными объектами исследований благодаря своим уникальным характеристикам, таким как широкие частотные полосы, высокое быстродействие, низкие значения фазовых шумов [1].

Однако, не всегда есть доступ к широкополосному оборудованию, что затрудняет задачу детектирования высокочастотных сигналов. Для решения данной проблемы используют эффект преобразования частоты, который позволяет детектировать гармонику на разностной частоте искомого и тестового сигналов (1).

$$\cos(v_1 t) * \cos(v_2 t) = \frac{1}{2} (\cos[(v_1 - v_2)t] + \cos[(v_1 + v_2)t]). \quad (1)$$

Требования к большой емкости и большой пропускной способности мгновенной полосы пропускания привели к тому, что радиочастотные (РЧ) системы работают на более высокой несущей частоте с более широкой полосой пропускания сигнала. Однако РЧ приборы имеют ограниченную полосу пропускания и уязвимы для помех, что не может удовлетворить требованиям высокочастотной и широкополосной работы [2].

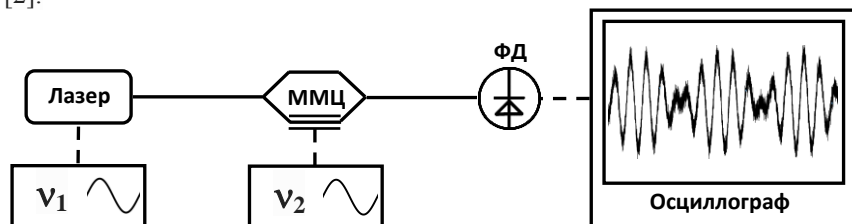


Рис. 1. Схема установки

Схема установки представлена на рис. 1. Излучение передающего оптического модуля ДМПО155-16 1.5 мкм с прямой модуляцией на частоте v_1 поступало на вход модулятора Маха-Цендера (ММЦ), на РЧ вход которого подавался сигнал на частоте v_2 . Далее сигнал детектировался с помощью приемного оптического модуля ДФДМШ40-16 (ФД), РЧ выход которого выводил информацию на осциллограф. Для спектрального анализа использовалась функция осциллографа FFT.

Таким образом, в частотной области сигнала можно наблюдать гармонику $v_1 - v_2$, анализ которой в процессе перестройки значения v_2 позволяет судить о частотном составе входного радиосигнала (в данной схеме v_1). Детектирование сигнала с ДФДМШ40-16 в полосе 1 ГГц позволило оценить частотный состав входного сигнала в полосе 16 ГГц. Мощность разностной гармоники в эксперименте недостаточна для эффективной оценки ее вклада во входной сигнал, однако с использованием информации о частотном составе сигнала открываются дополнительные возможности по оптимизации процесса аналого-цифрового преобразования.

Список литературы

1. Стариков Р.С. // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3-39.
2. Carmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photon. 2007. V. 1. No. 6. P. 319-330.

В.В. ШАРОГЛАЗОВА^{1,2}, Р.П. ЕРМАКОВ², В.Л. КУРОЧКИН²,
Ю.В. КУРОЧКИН²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл.*

**КВАНТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ,
ОСНОВАННЫЙ НА КОЛЕБАНИЯХ ВАКУУМА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛОСТИ
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА**

В настоящей работе мы демонстрируем прототип высокоскоростного квантового генератора случайных чисел (ГСЧ), источником энтропии в котором является вакуумная флуктуация электромагнитного поля внутри лазерной полости. Достигнутая скорость передачи данных в устройстве составляет более 1 Гбит/с. Генерация случайных битов основана на использовании лазерного диода с распределенной обратной связью и несбалансированного интерферометра Майкельсона. Как результат, мы получаем высококачественные квантово-случайные числа, которые проходят статистические тесты NIST без постобработки.

V.V. SHAROGLAZOVA^{1,2}, R.P. ERMAKOV², V.L. KUROCHKIN²,
Yu.V. KUROCHKIN²

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

²*Russian Quantum Centre, Skolkovo, Moscow region*

**QUANTUM RANDOM NUMBER GENERATOR
BASED ON VACUUM FLUCTUATION
OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD
IN THE CAVITY OF PULSED LASER DIODE**

In the present work we demonstrate the prototype of high speed quantum random number generator (QRNG), in which the source of entropy is vacuum fluctuation of the electromagnetic-field inside the laser cavity. The attained bit-rate of the device is over 1 Gbps. The generation of quantum-random bits is based on the use of a gain-switched distributed feedback (DFB) laser diode (LD) and an unbalanced Michelson interferometer; as a result we get high-quality quantum-random numbers that pass statistical NIST tests without post-processing.

Истинные случайные числа являются незаменимой составляющей таких систем и технологических областей, как моделирование методом

Монте-Карло, аутентификация, криптография и система безопасного квантового распределения ключей (QKD). Среди различных подходов к их генерации случайные числа, созданные путем использования законов квантовой механики, оказались надежными и могут быть получены с достаточной скоростью для их практического использования [1].

В настоящее время самые быстрые квантовые ГСЧ основаны на колебаниях вакуума, лазерном фазовом шуме или амплитудной флуктуации в усиленных шумах спонтанного излучения [2].

В данной схеме (рис. 1) формирование электрических импульсов, длительность каждого из которых около 100 пс, происходит на устройстве ПЛИС, после чего с помощью лазерного драйвера электрические импульсы преобразуются в оптические. Благодаря активному контролю усиления каждый импульс имеет истинно-случайную фазу. Временная задержка петли интерферометра создает цикл повторения импульсов. Интерферометр преобразовывает флуктуации фазы во флуктуации интенсивности. Сигналы обнаруживаются фотодетектором на основе PIN-фотодиода, после чего попадают на компаратор, где сравниваются с опорным напряжением, которое задает устройство ПЛИС. Компаратор конвертирует аналоговый сигнал в двоичную случайную последовательность.

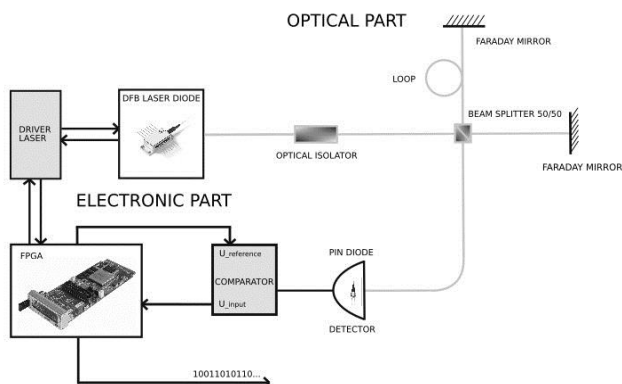


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Raffaelli F., Sibson P., et. al. // Optics Express. 2018. V. 26. P. 19730.
2. Jofre M., Curty M., et. al. // Optics Express. 2011. V. 19. P. 20665.

А.П. ПЛЁНКИН, И.А. КУРТИШОВ, Б.Х. НГУЕН, М.А. АНТОНЦОВ
Южный федеральный университет, Таганрог

КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧА В СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Описан основной способ использования квантового распределения ключа в структурированных телекоммуникационных системах с целью обеспечения повышенной защищенности передаваемых данных. Приведено описание классической конфигурации структурированной кабельной системы. Описана модель интеграции системы квантового распределения ключа в протоколы шифрования данных телекоммуникационной сети.

A.P. PLJONKIN, I.A. KURTISHOV, B.H. NGUYEN, M.A. ANTONTSOV
Southern Federal University, Taganrog

QUANTUM KEY DISTRIBUTION IN STRUCTURED CABLE SYSTEMS

The main method of using quantum key distribution in structured telecommunication systems is described in order to provide enhanced security of transmitted data. A description of the classic configuration of a structured cabling system. A model for integrating a quantum key distribution system into data encryption protocols of a telecommunications network is described.

Структурированные кабельные системы (СКС) являются основой любой информационно-телекоммуникационной среды современного предприятия. Структурированная кабельная система обладает высокими перспективами развития за счет увеличения производительности, снижения расходов на расширение, повышенного срока эксплуатации, возможности дальнейшей модернизации. Основным свойством телекоммуникационной СКС является универсальность ее интерфейсов. Если некоторое время назад при проектировании телекоммуникационной среды использовались различные коммутационные провода для различных систем, то сегодня для подключения большинства систем применяются стандартизированные проводники. Наибольшей популярностью и универсальностью при проектировании пользуется кабель "витая пара". Такой кабель является информационной средой для таких систем как видеонаблюдение, локальные вычислительные сети, телефония, IP телефония, система контроля и управления доступом, охранная и пожарная сигнализации. Исследования отдельных категорий

СКС изложены в ряде публикаций. Так, в [1] изложены принципы и основы построения СКС, рассмотрены классификации систем и особенности построения СКС различной архитектуры.

В СКС для обеспечения защищенности передаваемых данных применяются классические алгоритмы шифрования (в большей мере ассиметричные). Теоретическое появление сверхмощных вычислительных машин – квантовых компьютеров ставит под угрозу безопасность телекоммуникационных систем. Одно из современных решений обеспечения повышенной защищенности в системах связи базируется на применении методов квантовой криптографии [2], которые реализованы в системах квантового распределения ключей (СКРК) [3, 4]. Принципиальной отличительной особенностью таких систем является стойкость к вычислительным ресурсам злоумышленника. Функционирование систем квантового распределения ключа базируется на законах квантовой физики и принципиально исключает возможность несанкционированного перехвата сообщений. Известно, что стойкость классических алгоритмов упирается в пределы факторизации. На сегодняшний день задача факторизации актуализирована в направлении несовершенства систем квантового распределения ключа. Известно, что СКРК удовлетворяют правилам Шеннона для абсолютно секретных шифров, однако на практике это не выполняется. Последнее следует из низкой скорости формирования квантовых ключей. Как следствие последнего, эффективное использование систем квантовой связи (систем квантового распределения ключа) для обеспечения повышенной защищенности структурированных телекоммуникационных кабельных систем возможно только с учетом синтезированного метода шифрования. Так, при интеграции квантового ключа в алгоритм шифрования данных целесообразно модифицировать время жизни ключа и его длину. Также актуальным является применение метода XOR. При этом происходит смешивание квантового ключа с классическим криптографическим ключом. Последнее позволяет применять один квантовый ключ в нескольких модификациях конечного смешанного ключа.

Список литературы

1. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем. М.: ДМК Пресс, 2005.
2. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V. 74. № 1. P. 145-195.
3. Pljonkin A.P. Features of the Photon Pulse Detection Algorithm in the Quantum Key Distribution System. Doi: 10.1145/3058060.3058078.
4. Плёнкин А.П. Обнаружение фотонного импульса синхронизации в системе квантового распределения ключа // VI Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 356–358.

И.О. ВОРОНЦОВА, М.В. МЕЛЬНИК, С.Э. ПУТИЛИН,
А.Н. ЦЫПКИН, С.А. КОЗЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

АНАЛИЗ МЕТОДА Z-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ МАЛОПЕРИОДНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Путем численного моделирования показано, что использование метода Z-сканирования для определения нелинейного показателя преломления в случае малопериодных терагерцовых импульсов возможно только для импульсов с количеством колебаний больше одного. В противном случае погрешность измерения может быть больше 30 %. Предложена модификация метода, которая позволяет увеличить его чувствительность в 1,5 раза для неодноцикловых импульсов.

I.O. VORONTSOVA, M.V. MELNIK, S.E. PUTILIN,
A.N. TCYPKIN, S.A. KOZLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

ANALYSIS OF THE Z-SCAN METHOD FOR FEW-CYCLE TERAHERTZ PULSES

It is shown by means of the numerical simulation that Z-scan method can determine the nonlinear refractive index in the case of few-cycle terahertz pulses only for pulses with more than one oscillation. Otherwise, the measurement inaccuracy may be greater than 30 %. A modification of the method, which increases its sensitivity by a factor of 1.5 for non-single-cycle pulses is proposed.

В последнее время был достигнут значительный прогресс в развитии систем генерации терагерцового (ТГц) излучения высокой интенсивности [1], что позволило перейти к исследованиям в области нелинейной ТГц оптики [2]. Важнейшим параметром, характеризующим нелинейность отклика материала в поле интенсивных волн, является коэффициент его нелинейного показателя преломления.

В настоящей работе приведены результаты измерения в ТГц спектральном диапазоне нелинейного показателя преломления для кристалла ZnSe толщиной 0,3-3 мм стандартным [3] и модифицированным методами Z-сканирования для различных параметров ТГц импульса. Для численного моделирования используется уравнение распространения электромагнитного поля, учитывающее воздействие на сигнал дисперсии,

дифракции и нелинейности [4]. При моделировании стандартного метода Z-сканирования производилось вычисление энергии импульса в пределах выбранной апертуры. Особенность модификации метода заключается в вычислении максимума амплитуды сигнала в пределах выбранной апертуры. На рис. 1 и 2 представлены результаты сравнения моделирования стандартного и модифицированного метода Z-сканирования в зависимости от длительности ТГц импульса и толщины образца соответственно для значения нелинейного показателя преломления $4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{Вт}$ [5].

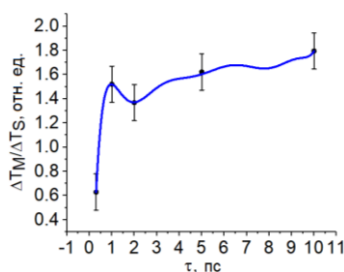


Рис. 1. Отношение величин перепада модифицированного и стандартного метода Z-сканирования, при толщине образца 0,3 мм в зависимости от длительности импульса

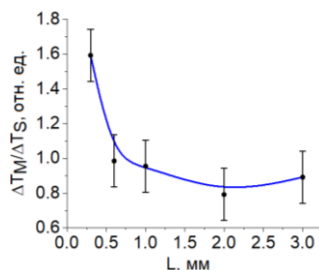


Рис. 2. Отношение величин перепада модифицированного и стандартного метода, для импульса с длительностью 1 пс в зависимости от толщины образца

В ходе сравнительного анализа полученных результатов было обнаружено, что модифицированный метод имеет в 1,5 раза большую чувствительность в случае многопериодных импульсов, что подтверждается увеличением величины перепада кривой Z-сканирования. Для истинно однопериодных импульсов метод теряет указанное преимущество, что может быть объяснено тем, что для импульса с длительностью 0,3 пс толщина исследуемого образца превышает пространственный размер импульса.

Список литературы

1. Zhang X.C., Shkurinov A., Zhang Y. // Nature Photonics. 2017. V. 11 (1). P. 16.
2. Junginger F., Mayer B., Schmidt C., Schubert O., Mährlein S., Leitenstorfer A., Huber R., Pashkin A. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 147403.
3. Sheik-Bahaе M., et. al. // IEEE journal of quantum electronics. 1990. V. 26 (4). P. 760-769.
4. Kozlov S.A., Samartsev V.V. // Woodhead Publishing Limited. 2013. P. 272.
5. Тсупкин А.Н., Путилин С.Е., Кулыа М.С., Дроздов А.А., Сиддики М., Чоудхари С., Zhao J., Bepalov V.G., Boyd R.W., Zhang X.C., Kozlov S.A. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. P. 05005-2.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН

Акционерное общество «Московский завод «Сапфир»

БИНОКЛЬ КРУГЛОСУТОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ С ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассматривается бинокль, содержащий из объектива, призмы Пехана, окуляра и ТВ камеры на базе EMCCD матрицы ПЗС с OLED дисплеем и радиопередатчиком. Бинокль работает круглосуточно. Его изображение может быть передано дистанционно и в персональный компьютер. Приведены основные параметры бинокля.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN

JSC «Moskovskij Zavod "Sapphir"»

BINOCULARS - ACTION WITH REMOTE IMAGE TRANSMISSION

Seen through binoculars, containing the lens, prism Pahana, eyepiece and TV camera on the basis of the EMCCD CCD with OLED display and the transmitter. Binoculars is available. His image can be transferred remotely in a personal computer. Given the basic parameters of binocular.

Обычные дневные бинокли предназначены для наблюдения в интересах работников МЧС, МВД, ФСБ, пограничных служб и др. [1]. Эти бинокли не обеспечивают круглосуточной работы и передачи изображения дистанционно и в персональный компьютер (ПК). бинокль, свободный от этих недостатков. На рис. 1 дана блок-схема бинокля, свободного от этих недостатков. Между объективом 1 и его фокальной плоскостью установлена призма Пехана 2 для получения прямого изображения. В фокальной плоскости объектива 1 установлена сетка 3. На нее сфокусирован окуляр 4. В другом таком же канале бинокля между объективом 1 и призмой Пехана 2 установлено первое дихроичное зеркало 5. Оно пропускает излучение в области спектра 0,38-0,78 мкм и отражает излучение в области спектра 0,8-1,1 мкм. В этой области спектра объектив 1 формирует изображение объекта и фона на матрице ПЗС ТВ камеры 6. Матрица ПЗС представляет собой EMCCD с чувствительностью до 10^{-4} лк [2]. Благодаря этому ТВ камера 6, а вместе с ней и весь бинокль могут работать круглосуточно. Видеосигнал с выхода ТВ камеры 6 передается в OLED дисплей. Он оптически сопряжен с помощью второго

дихроичного зеркала 8 с окуляром 4. Зеркало 2 пропускает в области спектра 0,38-0,78 мкм и частично отражает в области спектра в области спектра 0,53-0,56 мкм OLED дисплея 7. В бинокле совмещаются изображения дневное и с экрана OLED дисплея 7 с тем же масштабом. Ночью ТВ канал бинокля сохраняет работоспособность. Видеосигнал с выхода ТВ камеры 6 может быть передан в ПК с помощью соответствующего интерфейса. Эта информация хранится в памяти ПК, может быть подвергнута цифровой обработке и тиражированию. Видеосигнал с выхода ТВ камеры 6 передается также в миниатюрный радиопередатчик 9, который с помощью штыревой антенны 10 передает сигнал в эфир на дальность не менее 1 км. Масса цифрового бинокля не превышает 1,7 кг, угол поля зрения составляет 8° , увеличение 7 крат. Дальность распознавания грузовой автомашины составляет днем 65 км, ночью 2,5 км. ТВ камера с OLED дисплеем потребляют не более 0,8 Вт при питании от батареи с напряжением = 9 В. На рис. 2 дан внешний вид бинокля с дополнительным ЖК дисплеем с большим экраном.

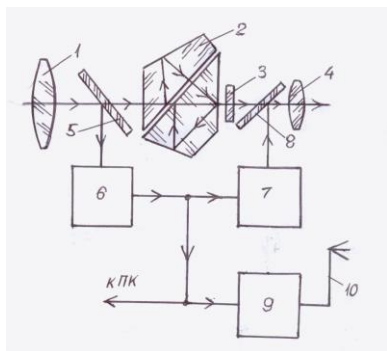


Рис. 1. Блок-схема канала бинокля со встроенной ТВ камерой



Рис. 2. Внешний вид бинокля

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.
2. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для систем безопасности. // Системы управления, безопасности и связи. 2016. № 3. С. 43-95.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН

Акционерное общество «Московский завод «Сапфир»

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДНЕВНО-НОЧНОЙ ПРИЦЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Рассматривается дневно-ночной и всепогодный прицельный комплекс для легкого стрелкового оружия, состоящий из тепло-телевизионного монокуляра и двухканального лазерного целеуказателя. Описаны основные параметры комплекса.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN

JSC «Moskovskij Zavod "Saphir"»

COMBINATION DAY / NIGHT SIGHTING SYSTEM

Considered day / night and all-weather sighting system for small arms, consisting of heat-television monocular and a 2-channel laser target designator. Describes the main parameters of the complex.

В настоящее время для бойцов спецподразделений МВД используется ночной прицельный комплекс «Альфа-1962» [1]. Он состоит из ночного монокуляра, крепящегося на шлеме и целеуказателя лазерного (ЦЛ), установленного на стрелковом оружии. ЦЛ излучает на длине волны 0,85 мкм, создавая на цели точечное пятно подсвета. При этом ось ЦЛ выверена по отношению к оси ствола оружия так, чтобы пули попадали в пятно подсвета. В ночной монокуляр наблюдается и цель, и пятно подсвета. Достаточно бойцу придать положение оружию, при котором пятно подсвета совместится с целью – и можно открывать огонь. Однако комплекс не обладает круглосуточностью и всепогодностью работы. Поэтому предложен новый прицельный комплекс, блок-схема которого дана на рис. 1. Объектив 1 работает в областях спектра 8-12 мкм и 0,4-1,1 мкм. Дихроичное зеркало 2 отражает в области спектра 8-12 мкм и пропускает в области 0,4-1,1 мкм. Объектив 1 создает тепловое изображение цели и фона на микроболометрической матрице (МБМ) 3 фотодетекторов, работающей в области спектра 8-12 мкм. Видеосигнал с ее выхода усиливается в первом видеоусилителе 4 и поступает на первый вход блока 5 электронной обработки (БЭО). Объектив 1 создает также изображение цели и фона в области спектра 0,4-1,1 мкм на матрице ПЗС EMCCD ТВ камеры 6 [2]. Видеосигнал с ее выхода усиливается во втором

видеоусилителе 7 и поступает на второй вход БЭО 5. В нем осуществляется цифровая обработка изображения сигналов и создается с помощью встроенного микропроцессора единое интегрированное изображение. Сигнал с выхода БЭО 5 поступает в OLED дисплей 9, с экрана которого наблюдается изображение. Работа в области 8-12 мкм обеспечивает круглосуточность и всепогодность работы. Работа в области 0,4-1,1 мкм также реализует круглосуточность работы и в меньшей степени – всепогодность, но создает высокое качество изображения. Дальность распознавания ростовой фигуры человека в монокуляре составляет не менее 400 м, угол поля зрения равен $40 \times 30^\circ$, увеличение 1 крат. Масса – не более 0,65 кг, энергопотребление 3 Вт при питании от = 9 В. В качестве ЦЛ используются два лазерных полупроводниковых излучателя непрерывного режима работы (ИЛПН): ИЛПН 14 с длиной волны 10,3 мкм и ИЛПН 18 с длиной волны 0,85 мкм. Излучение ИЛПН 14, работающего от драйвера 13, проходит через второе дихроичное зеркало 15, коллимируется с помощью объектива формирования излучения (ОФИ) 16 и создает точечное пятно подсвета. Излучение ИЛПН 18, работающего от драйвера 17, отражается от второго дихроичного зеркала 15 и также коллимируется с помощью ОФИ 16 и создает пятно подсвета, совпадающее с пятном подсвета от ИЛПН 14. Оба драйвера 13 и 17 запускаются от порогового устройства 12, управляемого БЭО 5. Внешний вид комплекса показан на рис. 2.

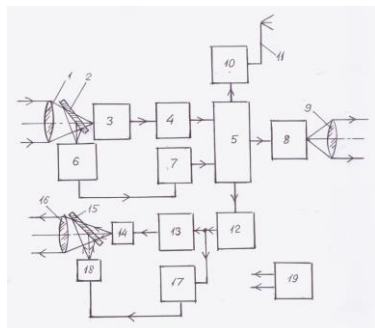


Рис. 1. Блок-схема комбинированного прицельного комплекса



Рис. 2. Внешний вид комплекса в рабочем положении

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.
2. Волков В.Г. Высокочувствительные телевизионные камеры для систем безопасности. // Системы управления, безопасности и связи. 2016. № 3. С. 43-95.

М.В. АГРИНСКИЙ, А.В. ГОЛИЦИН, В.В. СТАРЦЕВ¹

Технологический центр «Инженер», Чехов

¹*Опытное конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино*

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ КАМЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ СРЕД С «ОСОБЫМ» ХОДОМ ДИСПЕРСИИ

Впервые в отечественной практике создана гиперспектральная камера с широким спектральным диапазоном на пяти длинах волн (цветах), что превышает известный достигнутый мировой уровень. Для решения задачи использовались жидкостные оптические материалы с «особым» ходом дисперсии.

M. V. AGRINSKY, A. V. GOLITSIN, V. V. STARTSEV¹

Technological Center «Engineer», Tsekhov

¹*Astrohn Experimental Design Bureau, Lytkarino*

THE HYPER SPECTRAL CAMERA WITH APPLICATION OF OPTICAL LIQUID ENVIRONMENTS WITH THE "SPECIAL" COURSE OF DISPERSION

For the first time in domestic practice the hyper spectral camera with a wide spectral range at 5 waves (colors) is created. It exceeds the known reached world level. Liquid optical materials with the "special" course of dispersion were used for the solution of the task.

Гиперспектральная аппаратура предназначена для проведения измерений в широком оптическом диапазоне спектра и получения, как изображения, так и спектральных характеристик исследуемой поверхности. Для оптической системы гиперспектральной камеры, работающей в широком диапазоне спектра, требуется дифракционная абберационная коррекция как монохроматических, так и хроматических аббераций. Апохроматическая или суперхроматическая коррекция последних возможна только при использовании оптических материалов с разным ходом дисперсии. [1-3]. Для реализации гиперспектральной камеры широкого спектрального диапазона на 5 длинах волн (цветах), нами использовались жидкостные оптические материалы. Объектив реализован в виде двух групп, из трех линз каждая (рис. 1 и 2). Первая и третья линза в каждой группе работают оболочкой формирующей линзу из оптической жидкости в промежутке между ними. Фокусное расстояние

объектива $f' = 70$ мм. Набор стекол по каталогу Schott, по ходу луча: SF59, LAKN13, SF59, LAFN23. Найденные комбинации материалов, позволяют удержать расчетный хроматизм положения для зонального луча ($P_v = 0,7$) в пределах 0,9 мкм. Кривая хроматизма положения для зонального луча ($P = 0,7$) пересекает нулевое положение фокальной плоскости в 5 точках. Расчетный хроматизм положения для центра и края зрачка находится в пределах 1,8 мкм. Для использования в составе гиперспектральной камеры выбрана матрица ПЗС Sony ICX445AL. Матрица имеет рабочий спектральный диапазон 0,4-1 мкм, формат 1280 x 960 активных элементов расположенных с шагом 3,7 мкм. Размер диагонали фотоприемной зоны 6 мм.

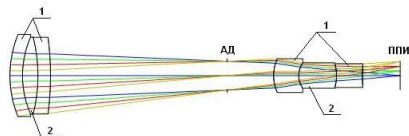


Рис. 1. Оптическая схема объектива: 1 - линзы, 2 - оптические жидкости, АД - апертурная диафрагма, ППИ - плоскость приемника изображения

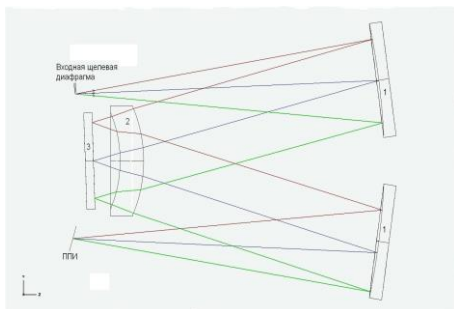


Рис. 2. Оптическая схема спектрального блока с плоской решёткой: 1 - зеркала, 2 - линза, 3 - дифракционная решетка

Список литературы

1. Голицын А.В., Ефремов В.С., Шлишевский В.Б. Некоторые варианты оптических систем на основе жидкостных элементов // Сборник трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика-2014». СПб.: Оптич. общ-во им. Д.С. Рождественского, 2014. Т. 3. С. 5.
2. Голицын А.В., Михайлов И.О., Шлишевский В.Б. Конструкция миниатюрного комбинированного объектива-моноблока с жидкими линзами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 76-80.
3. Голицын А.В., Ефремов В.С., Михайлов И.О., Оревова Н.В., Фёдоров Б.В., Шлишевский В.Б. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Вып. 1. Т. 5.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН

Акционерное общество «Московский завод «Сапфир»

ТЕПЛОТЕЛЕВИЗИОННЫЕ БИНОКУЛЯРНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Рассматриваются теплотелевизионные очки ночного видения, состоящие из ТВ и тепловизионного каналов и обеспечивающие круглосуточное и всепогодное наблюдение. Приводятся основные параметры прибора.

V.G. VOLCOV, P.D. GINDIN

JSC «Moskovskij Zavod «Sapphir»

THERMOVISION-TV BINOCULAR NIGHT VISION

Discusses thermovision-TV night vision goggles, consisting of TV and thermal imaging channels and provides all-weather surveillance. Provides the basic settings of the instrument goggles.

В настоящее время широкое распространение получили бинокулярные очки ночного видения (ОНВ), состоящие из двух идентичных каналов наблюдения на базе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) [1]. ОНВ позволяли наблюдать ночью и в сумерках, но они не обеспечивали возможность круглосуточного наблюдения и видения при неблагоприятных природных условиях (дымка, туман, дождь, снегопад и пр.), а также при воздействии мощных световых помех.

Для устранения этих недостатков предложены бинокулярные теплотелевизионные ОНВ по схеме (рис. 1), состоящей из широкоугольного ТВ канала 1 и узкопольного тепловизионного (ТВП) канала 2. Канал 1 содержит объектив 3, рассчитанный для области спектра 0,4-0,9 мкм, ЭОП 4, фокон 5, сопрягающий экран ЭОП 4 с матрицей ПЗС ТВ камеры 6, OLED дисплей 7 белого цвета свечения с числом пикселей 800 x 600 и с размером диагонали 17,5 мм. Объектив 3 имеет фокусное расстояние $f' = 10$ мм, угол поля зрения $2\omega = 100^\circ$, относительное отверстие $O = 1:1,4$. Окуляр 8 имеет $f' = 10$ мм, линейное поле зрения $2l = 17,5$ мм, диаметр выходного зрачка 10 мм при его удалении 20 мм. ТВП канал 2 содержит ИК объектив 9. Он рассчитан для области спектра 8-12 мкм, имеет $f' = 25$ мм, $O = 1:1$, $2\omega = 12 \times 8^\circ$. ТВП модуль 10 имеет те же габаритные размеры, что и ЭОП поколений 2⁺ и 3 с диаметром фотокатода 17,5 мм. Модуль 10 состоит из фокально-

плоскостной матрицы микроболометрических фотодетекторов с числом пикселей 320×240 , работающей без охлаждения в области спектра $8\text{-}12 \text{ мкм}$, электронного блока преобразования и цифровой обработки сигнала изображения, выполненного на основе интегральных схем, и OLED дисплея белого цвета свечения с числом пикселей 800×600 и с размером диагонали $17,5 \text{ мм}$. Второй окуляр 11 имеет $f' = 25 \text{ мм}$, $2l = 17,5 \text{ мм}$, диаметр выходного зрачка 10 мм , его удаление 20 мм . Поиск и обнаружение объекта наблюдения – ростовой фигуры человека (РЧФ) на дальности 200 м обеспечивается в канал 1 . ТВП канал 2 обеспечивает распознавание РЧФ при неблагоприятных условиях видения в $2\omega = 12 \times 8^\circ$ на дальности до 200 м . Масса ОНВ около 650 г . Изображение с выхода ТВП модуля 10 может быть передано дистанционно, подвергнуто цифровой обработке в реальном масштабе времени, введено в ПК или выведено на отдельный ТВ монитор. Достоинством ОНВ является простота их освоения в производстве, так как ОНВ выполнены в виде отдельных ТВП и ТВ модулей, конструктивно легко объединяемых в единый прибор. Внешний вид ОНВ показан на рис. 2.

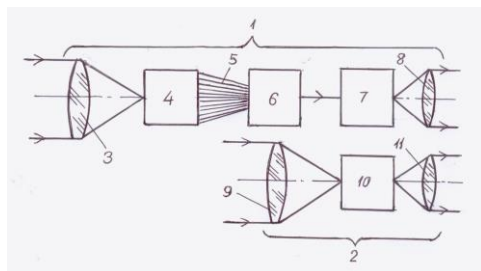


Рис. 1. Блок-схема теплотелевизионных ОНВ



Рис. 2. Внешний вид ОНВ

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости. 2009.

Н.А. КУЛЬЧИЦКИЙ, А.В. НАУМОВ¹, В.В. СТАРЦЕВ¹

АО «НПО «Орион», Москва,

¹Опытное конструкторское бюро «АСТРОН», Лыткарино

РАЗВИТИЕ РЫНКА НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МИКРОБОЛОМЕТРОВ В МИРЕ И РОССИИ

Приведен анализ состояния и перспектив развития в мире и в России рынка микроболометров (МБ) как важнейшего элемента ИК-систем. МБ перспективны для создания неохлаждаемых и относительно недорогих матриц фокальной плоскости. В обзоре рассмотрены МБ различных типов: металлические; полупроводниковые; композитные; кремниевые и др. Рассмотрены работы по использованию материалов: оксида ванадия, поликристаллического кремния и поликристаллического SiGe, α -Si, α -Ge и их соединений α -SiC:H, α -YBCO. Сформулированы основные тенденции развития рынка МБ.

N.A. KULCHITSKY, A.V. NAUMOV¹, V.V. STARTSEV¹

JSC "Scientific and Production Association «Orion», Moscow

¹Astrohn Experimental Design Bureau, Lytkarino

THE DEVELOPMENT OF WORLD AND RUSSIAN MARKETS OF UNCOOLED MICROBOLOMETRES

The analysis of current state and perspectives of microbolometers (MB) market are given. MB are perspective type of detectors for creation of uncooled and rather cheap *Focal Plate Array*. In the review IR-detectors of various types are considered: metal MB; semiconductor MB; composite MB; superconducting MB and others. Various materials are considered: oxide of vanadium, polycrystalline silicon and polycrystalline SiGe, not alloyed amorphous semiconductors such, as, α -Si, α -Ge and their connections α -SiC:H, α -YBCO. Main tendencies of MB market development are defined.

Болометры являются перспективным типом детекторов для создания неохлаждаемых и относительно недорогих МФП. За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в создании неохлаждаемых тепловых детекторов инфракрасного диапазона, которые приблизились по пороговым характеристикам к фотонным детекторам при значительно меньшей стоимости [1, 2].

В настоящее время широко используются оксид ванадия и легированный α -Si:H. Оксид ванадия VO_x обладает высокими значениями ТКС = 2-3 %. МБ на основе α -Si:H обладают высоким сопротивлением, но нестабилен при тепловых обработках и действии УФ. МБ на основе

карбида кремния SiC обладают высокими значениями ТКС (4-6 %), но требуется отжиг при температурах около 1000 °С. Рассмотрены МБ из поликристаллического кремния и поликристаллического SiGe [2-5]. Анализируются МБ на основе нелегированных α -Si, α -Ge и их соединений α -SiC:H. Рассмотрены возможности использования при создании болометров аморфного соединения $Ge_xSi_{1-x}O_y$, а также потенциальных ям на основе n-Si в подложке из p-Si.

Стоимость МБ на два порядка меньше, чем стоимость матриц на основе HgCdTe, InSb, PtSi, при этом типичные значения NETD для болометрических матриц составляет 50-100 мК (для HgCdTe типичны значения порядка 10 мК). Топологии МБ разных производителей приведены на рис. 1.

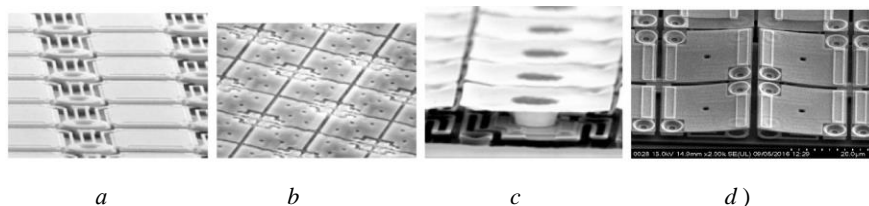


Рис. 1. Топология МБ разных производителей: ВАЕ на VO_x (a), Ullis на a-Si (b), DRS на VO_x (c), ОКБ «Астрон» на VO_x (d)

Основные тенденции развития МБ: переход на полный формат (1024x1280) и сверхкрупноформатные матрицы (2048x1536), повышение функциональных возможностей: двух- и многоспектральные МБ, повышение уровня технологий неохлаждаемых МБ матриц (корпусирование на кристалле и т.д.), поиск новых фоточувствительных материалов (графен, др. 2D-структуры и т.п.) [5].

Список литературы

1. Rogalski A. Infrared Detectors. 2-nd ed. London, New York: CRC-Press Taylor Francis Group, 2011.
2. Rogalski A. Next decade in infrared detectors // Proc. SPIE. 2017. V. 10433.
3. Bolometers /ed. Prof. A.G. Unil Perera. Rijeka: In Tech, 2012.
4. Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Несмелов С.Н. Неохлаждаемые микроболометры на основе поликристаллического SiGe для инфракрасного диапазона // Нано и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 41-47.
5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона-современное состояние и тенденции развития // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 10. С. 613-624.

Д.В. ДЯГИЛЕВА¹, В.А. КРИВЕНКОВ¹, П.С. САМОХВАЛОВ¹,
И.Р. НАБИЕВ^{1,2}, Ю.П. РАКОВИЧ^{1,3,4}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Университет города Реймс, Франция

³Университет страны Басков, Сан-Себастьян, Испания

⁴Научный фонд страны Басков, Бильбао, Испания

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ И ЗОЛОТЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ ПРИ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Благодаря своим нелинейно-оптическим свойствам, полупроводниковые нанокристаллы (НК) имеют большие перспективы применения в оптоэлектронике. При этом, объединение их с плазмонными наночастицами (ПНЧ), способно значительно улучшить эти свойства. В настоящей работе созданы тонкопленочные гибридные структуры НК-ПНЧ, измерены их сечения поглощения, времена жизни и квантовые выходы фотолюминесценции при двухфотонном возбуждении, а также определены режимы насыщения двухфотонного поглощения. Полученных данные показывают, что созданные наногибридные структуры являются эффективным двухфотонно-возбуждаемым флуоресцентным материалом для применения в оптоэлектронике.

D.V. DYAGILEVA¹, 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 HYBRID MATERIAL BASED ON SEMICONDUCTOR NANOCRYSTALS AND GOLD NANORODS UNDER TWO-PHOTON EXCITATION

Due to their nonlinear optical properties, semiconductor nanocrystals (NC) hold a great promise in optoelectronic applications. Moreover, their integration with the plasmonic nanoparticles (PNP) can significantly improve these properties. In this work, thin-films of NC-PNP hybrid structures were created and their absorption cross-section, excitation lifetimes and the photoluminescence quantum yields under the two-photon excitation have been measured and the saturation regimes of two-photon absorption have been determined. The data show that the fabricated nanohybrid structures are an effective two-photon-activated fluorescent materials for optoelectronic applications.

Благодаря своим уникальным нелинейно-оптическим свойствам, в частности способности генерации одновременно двух экситонов [1] и эффективной ап-конверсии в режиме двухфотонного возбуждения [2, 3], полупроводниковые квантовые точки (КТ) и нанопластины являются перспективными материалами в оптоэлектронике. При этом, эти свойства могут быть значительно усилены в присутствии металлических плазмонных наночастиц (ПНЧ). Так, вблизи золотых наностержней (НС), из-за усиленного двухфотонного поглощения, в полупроводниковых нанокристаллах (НК) наблюдается возрастание люминесценции [4] а также эффективная биэкситонная люминесценция [5]. При этом, важной задачей является изучение особенностей фотолюминесценции и оптимальных режимов двухфотонного возбуждения гибридных структур на основе НК и ПНЧ.

В настоящей работе созданы тонкопленочные гибридные материалы на основе НК различной структуры (КТ CdSe с оболочками ZnS и ZnS/CdS/ZnS и нанопластины CdSe) и золотых НС с резонансами в области люминесценции НК и в области лазерного возбуждения. Исследованы люминесцентные свойства полупроводниковых НК и НС. В режиме двухфотонного возбуждения, для созданных структур определены диапазоны перехода в режим насыщения поглощения, выявлены оптимальные интенсивности возбуждения и измерены времена жизни фотолюминесценции, рассчитаны значения сечений двухфотонного поглощения и квантового выхода. Результаты показывают, что наногибридные структуры на основе полупроводниковых НК и золотых НС являются эффективными флюорофорами при двухфотонном возбуждении, что значительно расширяет область их применения в оптоэлектронике.

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 18-72-10143.

Список литературы

1. Kershaw S.V. // Materials. 2017. V. 10. P. 1095.
2. Krivenkov V.A., et. al. // Optics letters. 2015. V. 40. P. 1440-1443.
3. Hafian H., et. al. // Nanomedicine: NBM. 2014. V. 10. P. 1701-1709.
4. Xin L., et. al. // Optics express. 2010. V. 18. P. 11335-11346.
5. Goncharov S.A., et. al. // Optics and spectroscopy. 2018. V. 125. P. 720-724.

Д.А. АГАФОНОВА, А.Н. БАБКИНА, Д.И. СОБОЛЕВ,
К.С. МОСКАЛЕВА, Р.К. НУРЫЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ЛИТИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БОРАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С ХРОМОМ

Представлены результаты исследования влияния концентрации ионов лития на люминесцентные характеристики боратных наностеклокерамик, легированных ионами трехвалентного хрома. Показано, что с увеличением концентрации лития квантовый выход и время жизни люминесценции стеклокерамик в видимой области увеличиваются, однако при этом уменьшается уровень пропускания материала в целом.

D.A. AGAFONOVA, A.N. BABKINA, D.I. SOBOLEV,
K.S. MOSKALEVA, R.K. NURYEV
ITMO University, Saint-Petersburg

EFFECT OF LITHIUM ON THE LUMINESCENT PROPERTIES OF BORATE GLASS CERAMICS WITH CHROMIUM

The results of the study of the lithium ions concentration effect on the luminescent characteristics of borate nanoglassceramics doped with ions of trivalent chromium are presented. It is shown that with an increase in lithium concentration, the quantum yield and the luminescence lifetime of glass ceramics in the visible region increase, but the transmission level of the material decreases.

Существует общая тенденция в современном развитии оптического материаловедения, состоящая в повышенном интересе к созданию и изучению свойств наноразмерных объектов. С точки зрения оптических свойств особый интерес представляют наноразмерные кристаллы, содержащие примесные ионы переходных металлов. Данные объекты могут быть получены в стеклообразных матрицах. Среди известных способов синтеза главное место занимает термоиндуцированная объемная кристаллизация. В зависимости от своего окружения, ионы трёхвалентного хрома имеют различные оптические свойства. Стеклокерамики, активированные ионами хрома, при наличии его в кристаллической фазе, обладают интенсивной узкополосной люминесценцией в видимой области спектра. Такие материалы могут найти свое применение при создании волоконных усилителей, в лазерной

технике и оптоэлектронных устройствах. При нахождении ионов хрома в аморфном окружении, такой материал демонстрирует низкоинтенсивную люминесценцию в ближней ИК области.

Было синтезировано стекло состава $x \text{Li}_2\text{O}-(25-x) \text{K}_2\text{O}-25 \text{Al}_2\text{O}_3-50 \text{B}_2\text{O}_3$ с добавкой 0.1 Cr_2O_3 (мол%). Синтез проходил в корундовых тиглях при температуре 1400°C с перемешиванием расплава в воздушной атмосфере платиново-родиевой мешалкой. Абсолютный квантовый выход и спектр люминесценции были измерены на установке Absolute PL Quantum Yield Measurement System (фирма Hamamatsu).

Для подбора оптимальных режимов термообработок все стекла исследовались методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием калориметра STA 449F1 Jupiter (Netzsch). После проведения изотермической обработки при температурах 600-700 °C стекла приобретали розоватый оттенок, а в спектре люминесценции появлялись интенсивные линии в области 650-750 нм.

Исследование методом дифракции рентгеновских лучей с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV (Япония) показало, что после проведения термообработки в образцах сформировались области нанокристаллической фазы состава $\text{Li}(\text{Al}_7\text{B}_4\text{O}_{17})$: Cr^{3+} . Средний размер кристаллических частиц составил порядка 15-20 нм. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние концентрации окиси лития и температуры изотермической обработки стекол на значения квантового выхода люминесценции ионов хрома

Содержание Li_2O , мол%	Температура термической обработки	Квантовый выход, %
0	600	близок к 0
	630	
	700	
5	600	13.6
	630	20.6
	700	34.4
10	600	33.7
	630	39.8
	700	42.5
12.5	600	36.5
	630	40.8
	700	47.8

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00780.

Ю.Л. АЛЕКСЕЕВ, П.А. БЕЛОВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И КИСЛОРОДНОЙ ЕМКОСТИ КРОВИ В ПРИБОРЕ ПУЛЬСОКСИМЕТР

Приведены результаты исследований излучения люминесценции в пульсоксиметре, с целью физического обоснования работы прибора, по измерению кислородной емкости крови, и влияния ее на организм человека.

Yu.L. ALEKSEEV, P.A. BELOV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

RESEARCH ON THE LINKAGE BETWEEN LUMINESCENCE AND BLOOD OXYGEN CONTENT IN A PULSE OXIMETER

The thesis shows the research results of luminescent light in a pulse oximeter for the goals of physical justification of the device operation for a measuring of blood oxygen content and influence of this content to the human body.

Пульсоксиметрия – это измерение процентного содержания оксигемоглобина (или, как это называется по-другому, насыщения гемоглобина крови кислородом) в артериальной крови, которое происходит с помощью специального прибора под названием пульсоксиметр. Работа пульсоксиметра основана принципах спектрофотометрии. Гемоглобин, насыщенный кислородом, по-другому, нежели гемоглобин без кислорода, проницаем светом, и фотодетектор пульсоксиметра улавливает это различие и передает результаты в микропроцессор, который и анализирует их. Датчики работают по очереди и одновременно, включаются и выключаются попеременно, чтобы процессор смог отделить их систематическое воздействие на ткани от обычного внешнего света, который не должен никак сказываться на результатах исследования. Определенные данные уже изначально заложены в пульсоксиметр – он знает, что гемоглобин, связанный с кислородом, лучше поглощает инфракрасный свет, а «чистый» гемоглобин – красный, и на основе этих данных он и выводит на дисплей итоговые результаты.

Целью работы является исследование люминесценции в пульсоксиметре. На рис. 1 представлена структурная схема

пульсоксиметра. Мы рассматривали как стационарный, так и портативный пульсоксиметр.

Действие спектрофотометрических сенсоров основано на том, что большинство веществ имеют свои специфические спектры излучения и поглощения. Поэтому при прохождении света сквозь вещество его спектральный состав изменяется. По этим изменениям можно выявить присутствие контролируемого вещества (аналита), а измеряя величину изменений спектральных интенсивностей количественно, – вычислить концентрацию аналита. Основной закон прохождения света сквозь вещество в дифференциальной форме имеет вид: $dI = -KI(x)dx$. Ослабление света может происходить как за счет поглощения, так и за счет рассеяния света веществом (рис. 2).

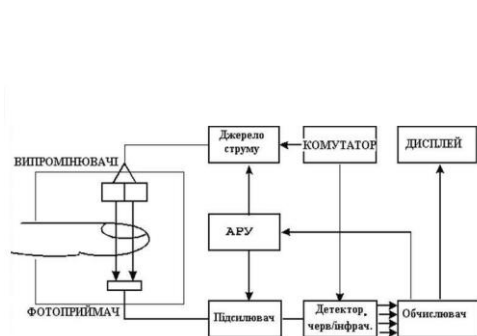


Рис. 1. Структурная схема пульсоксиметра

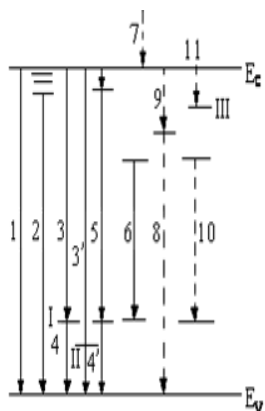


Рис. 2. Энергетические переходы, сопровождающиеся выделением энергии

Список литературы

1. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Наука, 2004.
2. Левшин В.Л. Фотолуминесценция жидких и твердых веществ. Л.-М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1951.
3. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Проблемы нелинейной оптики. М.: ВИНТИ, 1964.
4. Pringsheim P., Vogel M. Luminescence of Liquids and Solids. Interscience Publishers, 1946.

К.В. ОРЕШКИНА, В.Д. ДУБРОВИН, А.И. ИГНАТЬЕВ,
И.С. ПИЧУГИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ХЛОРИДНЫХ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ С РАЗЛИЧНЫМИ ЩЕЛОЧНЫМИ ИОНАМИ В СОСТАВЕ

В работе впервые синтезированы и исследованы хлоридные фототермомерефрактивные стекла, содержащие в своем составе помимо натрия другие щелочные ионы.

K.V. ORESHKINA, V.D. DUBROVIN, A.I. IGNATIEV,
I.S. PICHUGIN

ITMO University, Saint-Petersburg

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF CHLORIDE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES WITH VARIOUS ALKALINE IONS

In this work chloride photo-thermo-refractive glasses containing in addition to sodium other alkaline ions were synthesized and study for the first time.

Классические фторидные фототермомерефрактивные (ФТР) стекла представляют собой натриево-цинк-алюмосиликатные стекла, содержащие в своем составе Се, Sb и Ag, которые являются донором и акцепторами электронов, соответственно, и галогены (Br, F), участвующие в формировании кристаллической фазы с меньшим показателем преломления ($n_d = 1,325$), чем показатель преломления матрицы стекла ($n_d = 1,498$) [1]. Такие ФТР-стекла широко используются для записи объемных брэгговских решеток для создания на их основе лазерных узкополосных фильтров [2], комбайнеров световых пучков [3] и т.д. Выделение в объеме стекла нанокристаллической фазы с большим показателем преломления, чем показатель преломления матрицы, например, нанокристаллов хлорида серебра ($n_d = 2,071$), позволяет записывать волноводные и интегрально-оптические структуры на основе таких стекол. Такие стекла получили название «хлоридных ФТР-стекол».

В данной работе было проведено исследование влияния щелочных ионов на спектрально-люминесцентные свойства хлоридных ФТР-стекол.

Для проведения исследований были синтезированы стекла на основе $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-R}_2\text{O}$ (где $R = \text{Li, K, Rb, Cs}$) системы. Концентрация R_2O составляла 50 % от общего содержания $\text{Na}_2\text{O} + \text{R}_2\text{O}$, которое остается постоянным и равняется 15 мол. %. Синтез стекла проводился при температуре 1500 °С в воздушной атмосфере в кварцевых тиглях с перемешиванием расплава платиновой мешалкой. Температуры стеклования были измерены с помощью дифференциального сканирующего калориметра. Образцы облучались УФ-излучением ртутной лампы и термообрабатывались (ТО) в градиентной печи при температурах ниже и выше температуры стеклования от 1 до 10 часов. Спектры поглощения измерялись в диапазоне длин волн 200-800 нм на всех стадиях эксперимента. Спектры люминесценции были измерены при возбуждении излучением с длиной волны 360 нм.

Температура стеклования (T_g) исследованных стекол повышается с ростом атомного номера щелочного иона. Спектры поглощения исходных (необлученных) ФТР-стекол сходны между собой. После УФ-облучения наблюдается увеличение поглощения в области 350–550 нм для всех стекол, что связано с образованием нейтральных серебряных молекулярных кластеров (СМК) типа Ag_n . Последующая ТО ниже T_g приводит к увеличению числа нейтральных СМК, обладающих люминесценцией в видимом и ближнем ИК-диапазонах. В результате ТО при температуре на 50 °С ниже T_g происходит образование наночастиц серебра с плазмонной полосой поглощения на 410 нм. УФ-облучение и ТО выше T_g вызывают рост наночастиц серебра без оболочки в стеклах, что не приводит к локальному изменению показателя преломления облученной области по сравнению с необлученной и, как следствие, не позволяет записывать на данных стеклах голограммы.

В результате были изучены спектрально-люминесцентные свойства хлоридных ФТР-стекло, содержащих в своем составе различные ионы щелочных металлов. Такое стекло с СМК можно успешно использовать в качестве даун-конвертора для солнечных элементов и люминофора для белых светодиодов.

Список литературы

1. Nikonorov N., Ivanov S., Dubrovin V., Ignatiev A. // Holographic Mater. and Opt. Systems. InTech. 2017. P.435-461.
2. Lumeau J., Smirnov V., Glebov A., Glebov L. // Proc. of SPIE. 2010. V. 7675. P. 76750H.
3. Andrusyak O., Smirnov V., Venus G., Glebov L. // Optics Comm. 2009. V. 282. P. 2560–2563.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, В.М. НАЛБАНДЯН
Оренбургский государственный университет

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследованы частотные зависимости интенсивности свечения двухкомпонентной системы «квантовая точка – плазменная наночастица» в постоянном магнитном поле. Показано, что с изменением индукции магнитного поля наблюдается трансформация спектров экситонной люминесценции таких систем в результате конкуренции радиационных и безызлучательных каналов распада.

M.G. KUCHERENKO, V.M. NALBANDYAN
Orenburg State University

TRANSFORMATION OF THE LUMINESCENCE SPECTRA OF QUANTUM DOTS NEAR PLASMON NANOPARTICLES IN A MAGNETIC FIELD

The frequency dependences of the luminescence intensity of a two-component system “quantum dot – plasmon nanoparticle” in a magnetic field are investigated. It is shown that, with a change in the magnetic field induction, a transformation of the exciton luminescence spectra of such systems is observed as a result of the competition of radiation and nonradiative decay channels.

Известно, что электрическая дипольная поляризуемость $\tilde{\alpha}(\omega|\mathbf{B})$ проводящей частицы в монохроматическом поле частоты ω во внешнем магнитном поле индукции \mathbf{B} становится тензором [1]. Тогда выражение для скорости $w_{sp}(\omega|\mathbf{B},\mathbf{r})$ рекомбинационной (экситонной) люминесценции полупроводниковой квантовой точки (КТ), расположенной вблизи наночастицы (НЧ), на расстоянии r от ее центра, при наличии внешнего магнитного поля принимает следующий вид [2]

$$w_{sp}(\omega|\mathbf{B},\mathbf{r}) = \frac{4}{3} \frac{\omega^3}{\hbar c^3} \left[\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) \tilde{\alpha}(\omega|\mathbf{B}) \right] \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \int_0^{R_c} \mathbf{P}(r) 4\pi r^2 dr \quad (1)$$

Здесь $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{r}) = r^{-3} (3\mathbf{n} \otimes \mathbf{n} - \tilde{\mathbf{I}})$ – квазистатическая диадическая функция Грина точечного дипольного источника. Вектор поляризации

сферической квантовой точки $\mathbf{P}(r)$, возникающей при активации в КТ экситона Ванье-Мотта в условиях сильного и слабого конфайнмента имеет вид [3]

$$\mathbf{P}(r) = \frac{\mathbf{d}_{vc}}{2\pi R_c} \frac{\sin^2(\pi r / R_c)}{r^2}, \quad \mathbf{P}(r) = \frac{\mathbf{d}_{vc}}{\sqrt{2\pi^2 R_c r_B^3}} \frac{\sin(\pi r / R_c)}{r}, \quad (2)$$

где \mathbf{d}_{vc} – векторный матричный элемент межзонного электронного дипольного момента перехода; R_c, r_B – радиус КТ и боровский радиус.

Для объяснения изменений в электронных спектрах спонтанного свечения двухкомпонентных систем «КТ-НЧ», вызванных внешним магнитным полем, на основе (1)-(2) предложена модификация простейшей модели [2] спонтанных электродипольных переходов в комплексах с НЧ.

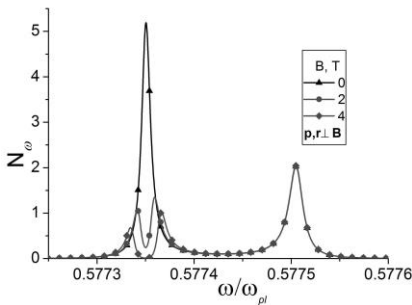


Рис. 1. Спектральная плотность числа фотонов, испущенных системой «КТ -наночастица» на частоте ω , в магнитном поле различной индукции B : $R=7$, $r=12$ нм. $\omega_{pl} = 13.87 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$, $\mathbf{p} \perp \mathbf{B}$

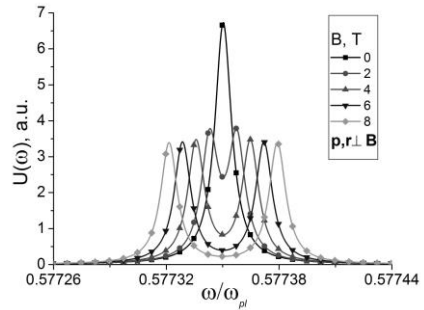


Рис. 2. Частотные зависимости скорости U безызлучательного переноса энергии от КТ к плазмонной наночастице радиуса $R=7$ нм в магнитном поле различной индукции B

Эффект влияния металлических наночастиц на радиационные переходы в КТ при наличии внешнего магнитного поля исследован на основе выражения для скорости экситонной эмиссии КТ, полученного с учетом диссипации энергии возбуждения на плазмонных модах НЧ для различных геометрических конфигураций системы (рис. 1 и 2).

Список литературы

1. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // J. Opt. Technol. 2018. V. 85. P. 524-530.
2. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 136-142.
3. Агранович В.М., Баско Д.М. // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 69. С. 232-235.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ^{1,2}, С.М. ДЗЯДУХ¹, А.П. КОХАНЕНКО¹,
В.В. ДИРКО¹, К.А. ЛОЗОВОЙ¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Сибирский физико-технический институт ТГУ, Томск

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР С ЭМИССИОННЫМ СЛОЕМ Alq3

Приведены результаты экспериментальных исследований методами вольтамперных характеристик, адмиттанса и переходной электролюминесценции свойств многослойных структур ITO/PEDOT:PSS/Alq3/LiF/Al, перспективных для создания органических светодиодов. Выявлены закономерности формирования электрофизических свойств исследованных структур в широком диапазоне температур и смещений.

A.V. VOITSEKHOVSKI^{1,2}, S.M. DZYADUKH¹,
A.P. KOKHANENKO¹, V.V. DIRKO¹, K.A. LOZOVOY¹

¹National Research Tomsk State University

²Siberian Physical-Technical Institute TSU, Tomsk

ELECTROPHYSICAL AND RADIATION PROPERTIES OF OLED STRUCTURES WITH EMISSION LAYER Alq3

The results of experimental studies by the methods of current-voltage characteristics, admittance and transient electroluminescence of the properties of multilayer ITO/PEDOT:PSS/Alq3/LiF/Al, promising for the creation of organic LEDs, are presented. The regularities of the formation of the electrophysical properties of the studied structures in a wide range of temperatures and bias voltages were revealed.

Исследования электрических и электролюминесцентных свойств новых типов структур для органических светоизлучающих диодов (ОСИД) необходимы для разработки ряда перспективных оптоэлектронных приборов [1, 2]. Достоинствами таких приборов станут относительно невысокая стоимость, возможность использования при их создании разнообразных несложных технологических приемов. Органические пленки могут наноситься на гибкие подложки, создаваемые оптоэлектронные устройства можно оптимизировать для действия в различных спектральных диапазонах. Одной из перспективных систем является диодная структура ITO/PEDOT:PSS/Alq3/LiF/Al, в которой смесь

диоксидов индия и олова выполняет роль анода, транспортный слой создан из полимера PEDOT:PSS, а эмиссионный – на основе Alq₃, катод образован слоями LiF и Al [3].

Целью работы является экспериментальное исследование электрических и излучательных свойств многослойных ОСИД структур ITO/PEDOT:PSS/Alq₃/LiF/Al при различных толщинах слоя Alq₃ (от 30 до 80 нм) в широком диапазоне условий измерения.

Для образцов с различными толщинами слоя Alq₃ методом переходной электролюминесценции [4] найдены характерные времена (задержки и насыщения электролюминесценции), а также подвижности носителей заряда [3]. Характерные времена задержки и насыщения оказались наименьшими (4.4 и 10.4 мкс, соответственно) для образца с толщиной слоя Alq₃, равной 50 нм, что можно объяснить неоднородностью толщины полимерного слоя при его больших толщинах. Наибольшие значения подвижности, которые находятся в диапазоне $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, определены для структуры с толщиной слоя Alq₃, равной 80 нм. Показано, значительная часть напряжения смещения падает на слое электронного типа проводимости [3].

Измерения адмиттанса ОСИД структур обеспечивают важную информацию о свойствах органических слоев и границ между различными слоями [5]. Электрофизические характеристики образцов исследовались при помощи разработанного автоматизированного комплекса в диапазоне температур от 8 до 300 К и частот тестового сигнала от 1 кГц до 2 МГц. Показано, что вольтамперные характеристики образцов имеют диодный тип, ток через ОСИД структуру уменьшается при снижении температуры. Для структуры с толщиной слоя Alq₃, равной 80 нм, в диапазоне температур от 100 до 150 К на прямой ветви вольтамперной характеристики обнаружена особенность, которая может являться проявлением неоднородности свойств образца. Изучены зависимости адмиттанса структур от напряжения, частоты и температуры.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках проекта № 18-43-700005.

Список литературы

1. Jou J.N., Kumar S., et. al. // J Mater. Chem. C. 2015. V. 3 (13). P. 2974.
2. Wu S., Li S., et. al. // Sci. Reports. 2016. V. 6. P. 25821.
3. Зятиков И.А., Войцеховский А.В. и др. // Изв. высш. учеб. завед. Физика. 2015. Т. 58 (8/2). С. 252-255.
4. Romanov I.V., Voitsekhovskii A.V., et. al. // Russ. Phys. J. 2015. V. 57 (11). P. 1584-1592.
5. Petrosino M., Rubino A. // J Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 114504.

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

ЭЛЕКТРОХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АНОДОВ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Показана возможность генерации электрохемилюминесценции (ЭХЛ) некоторых металлов в чистой дистиллированной воде, что исключает необходимость учета каких-либо примесей-добавок в электролите при интерпретации спектров ЭХЛ. Установлено достоверное возникновение явления при напряжении более 500 V для W и Al, и его отсутствие для некоторых благородных металлов.

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

ELECTROCHEMILUMINESCENCE OF METAL ANODES IN DISTILLED WATER

The possibility of the generation of electrochemiluminescence (ECL) of some metals in pure distilled water, which eliminates the need to take into account any impurity additives in the electrolyte when interpreting the spectra of ECL, is shown. A reliable occurrence of the phenomenon has been established at voltages above 500 V for W and Al, and its absence for some noble metals.

Возникающая при электролитическом анодировании некоторых металлов электрохемилюминесценция (ЭХЛ) преимущественно исследовалась в водных растворах электролитов [1-3]. Настоящая статья посвящена первым результатам выявленной возможности генерации ЭХЛ в чистой дистиллированной воде (ДВ) и исследования явления без каких-либо добавок-примесей в ДВ.

Регистрация ЭХЛ осуществлялась при максимальной чувствительности ФЭУ-70, ориентированного фотокатодом к металлическому (Me) аноду в виде проволоки или пластины, который располагался в стеклянной электрохимической кювете напротив Pt-анода. Анодом служили следующие Me таблицы Д. Менделеева: Pt, Pd, Ir, Cu, Ti, W и Al чистотой не менее 99,95 %. Начиная от приложенного к электродам постоянного напряжения $U \sim 500$ В только на двух последних металлах достоверно регистрировалась ЭХЛ светимостью I . Та же закономерность сохранялась и при $U = 1$ кВ, что соответствует

известным литературным данным для этих металлов [1-3]. Одновременно с ЭХЛ контролировались: изменение температуры ΔT ДВ относительно исходной в 298 К и плотность тока J , протекающего через ячейку в течение $t = 300$ с приложенного U . По данным регистрируемых параметров определялись: моменты возникновения тока в ячейке J_0 и зажигания ЭХЛ t_z , ее светимость I_z в момент t_z и токе J_z , а также скорость разгорания – $v_l = \Delta I \cdot \Delta t^{-1}$ и эффект изменения $\eta = (J_k - J_0) \cdot J_0^{-1}$ конечной плотности тока J_k относительно J_0 . Усредненные по трем измерениям результаты оценки перечисленных параметров при $U = 1$ кВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Me	$t_z, \text{с}$	$J_0, \text{А} \cdot \text{М}^{-2}$	$J_z, \text{А} \cdot \text{М}^{-2}$	$I_z \cdot 10^{-5}, \text{лм} \cdot \text{М}^{-2}$	$v_l \cdot 10^{-6}, \text{лм} \cdot \text{М}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	η	$\Delta T, \text{К}$
Al	40±1	274±33	267±33	5,9±1,3	5,4	-0,20	27±1,8
W	43±1	381±55	380±16	2,6±0,8	0,4	0,15	11±0,8

Как видно из табл. 1, почти при одинаковом t_z разница I_z между Al и W составляет в ~ 2 раза, тогда как плотность тока их возникновения при этом различается в 1,4 раза, а v_l от момента возникновения ЭХЛ до окончания времени приложенного U – в $\sim 13,5$ раз. Обнаруженное различие знака эффекта η между Me указывает на то, что в случае Al-анода плотность тока относительно J_0 за 300 с уменьшается, а в случае W-анода – возрастает. Несмотря на это, при обоих видах Me происходит нагрев ДВ. Причем в системе с Al-анодом, имеющей тенденцию к уменьшению тока, наблюдается наибольший термический эффект, на ~ 16 К превышающий таковой для системы с W-анодом. Полученные в работе результаты свидетельствуют не только о возможности генерации ЭХЛ в чистой ДВ, но и исследовании явления без специальных добавок в ней, отсутствие которых не нарушает основных закономерностей ЭХЛ [1-3].

Список литературы

1. Stojadinović S., Vasilic R., Kasalica B., et. al. Luminescence During the Electrochemical Oxidation of Aluminum // Electr. and Surface Finishing. MAOE. 2014. V. 57. С. 241-302.
2. Гриднев А.Е., Чернышев В.В. Спектры электролюминесценции анодного оксида алюминия в различных электролитах // Вестник ВГУ. Сер.: Физика. Математика. 2005. № 2. Р. 8-10.
3. Ikonopisov S. Problems and contradictions in galvanoluminescence: a critical review // Electrochimica Acta. 1975. V. 20. №10. Р. 783-793.

М.Д. ПАВЛОВА, И.А. ЛАМКИН, С.А. ТАРАСОВ
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ АКТИВНЫХ СЛОЕВ НА СПЕКТРЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ZnPc:C₆₀

В работе рассмотрено влияние толщины активных слоев ZnPc:C₆₀/C₆₀ органических фоточувствительных структур, которые создавались методом вакуумного термического осаждения на стеклянной подложке, на оптические характеристики. Наилучшие параметры фоточувствительности соответствуют образцу с толщиной активных слоев порядка 340 нм.

M.D. PAVLOVA, I.A. LAMKIN, S.A. TARASOV
Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THICKNESS OF ACTIVE LAYERS ON THE SPECTRUM OF PHOTOSENSITIVITY OF STRUCTURES BASED ON THE SYSTEM ZnPc:C₆₀

The paper considers the effect of the thickness of the ZnPc:C₆₀/C₆₀ active layers of organic photosensitive structures, which were created by vacuum thermal deposition on a glass substrate, on the optical characteristics. The best photosensitivity parameters correspond to a sample with a thickness of the active layers of about 340 nm.

В настоящее время ведется активный поиск альтернативных источников энергии. Для преобразования энергии солнца в электрическую используются солнечные батареи. Сейчас на рынке преобладают кремниевые батареи, но они имеют ряд недостатков, такие как сложность технологического процесса, хрупкость, и высокая стоимость. Использование органических материалов в качестве активных слоев позволяют снизить цену преобразования энергии. Низкая стоимость таких солнечных элементов связана с простотой технологии их изготовления, а так же дешевизной самих органических материалов. Как правило, органические полупроводники хорошо растворяются в органических растворителях, это позволяет наносить их методом струйной печати на гибкие подложки из полимера. Гибкость – важное достоинство органических солнечных батарей, поскольку технология современной

электроники базируется на использовании жестких, но при этом хрупких структур. Органические полупроводники позволяют создавать гибкие структуры, которые можно интегрировать в одежду, облицовочные покрытия, упаковку продуктов и др.

Целью работы является исследование характеристик органических фоточувствительных структур на основе фталоциана цинка и фуллерена с разной толщиной активных слоев. В качестве подложки в эксперименте было использовано стекло, покрытое слоем FTO (Fluorine-doped Tin Oxide), который выполняет роль оптически прозрачного контакта. На поверхность FTO методом вакуумного термического испарения последовательно наносились слои ZnPc (Zinc phthalocyanine): C₆₀ (Fullerene)/C₆₀/Al. Была изготовлена серия образцов с различной толщиной активных слоев, которая варьировалась путем изменения массы испаряемого вещества.

Ниже представлены толщины активных слоев и масса испаряемых веществ (мг) ZnPc:C₆₀/C₆₀: 1 образец: h₁ = 400 нм (15:20/ 25); 2 образец: h₂ = 470 нм (15:25/ 30); 3 образец: h₃ = 340 нм (15:10/ 20).

Для созданных структур были исследованы спектры фоточувствительности с помощью дифракционного решеточного монохроматора с использованием пикоамперметра Keithley 6483. Для получения максимальной фоточувствительности необходимо подобрать такие толщины активных слоев, при которых обеспечивается высокое поглощение и эффективная генерация носителей заряда, что обусловлено особенностью органических материалов, в которых под влиянием света образуются связанные носители заряда – экситоны. Диссоциация экситона на свободные носители может быть осуществлена на гетеропереходе ZnPc/C₆₀. Характерное расстояние, которое проходит экситон за время жизни во фталоцианине цинка составляет несколько нм, следовательно, вклад в фототок могут обеспечить только фотоны, поглощенные вблизи области гетероперехода. В эксперименте наибольшее значение ширины пика чувствительности на полувысоте 160 нм соответствует третьему образцу, также для этого образца наблюдается большая чувствительность в видимом диапазоне длин волн, пик чувствительности соответствует длине волны 687 нм. Так же было выявлено, что спектры фоточувствительности исследуемых образцов качественно согласуются со спектрами поглощения, так при увеличении массы испаряемого фуллерена максимум чувствительности смещается в длинноволновую область (722 нм), что обусловлено большим поглощением в слое фуллерена.

А.Д. ДМИТРИЕВ, А.М. САЛЕЦКИЙ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПЛАЗМОННО-СВЯЗАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА ТОНКИХ НИКЕЛЕВЫХ ПЛЕНКАХ

Экспериментально и теоретически изучен вопрос влияния тонких (13 нм) никелевых плёнок на люминесценцию молекул Родамина 6Ж, находящихся в малой близости от поверхности металла. Представлены модифицирование пространственного распределения излучения и особенности взаимосвязи поверхностного плазмонного резонанса и плазмонно-связанного излучения в сильно поглощающей среде.

A.D. DMITRIEV, A.M. SALETSKY
Lomonosov Moscow State University

SURFACE PLASMON COUPLED EMISSION FROM NICKEL THIN FILMS

The effect of thin (13 nm) nickel films on the luminescence of Rhodamine 6G molecules, which are in close proximity to the metal surface, has been studied experimentally and theoretically. The modification of the spatial distribution of radiation and features of the relationship between surface plasmon resonance and surface plasmon coupled emission in a strongly absorbing medium are presented.

Плазмонно-связанное излучение является обратным эффектом по отношению к явлению поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Оно наблюдается при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) и их излучательном тушении при соблюдении условий согласования для фотона и ППП. При этом отличительными чертами связанного излучения являются узкая пространственная направленность и преимущественная Р-поляризованность, обусловленные свойствами ППП [1].

В данной работе представлены результаты исследования связанного излучения, наблюдавшегося на тонкой никелевой плёнке (13 нм) покрытой слоем SiO₂ (10 нм) для защиты красителя от быстрого тушения на малых расстояниях, и слоем ПВС (30 нм) с содержанием Р6Ж 10⁻³ моль/л.

Экспериментальные данные и теоретическая модель для излучения красителя в такой структуре оказались в хорошем согласии (рис. 1). При

этом, стоит отметить, что излучение наблюдается на углах отличных от угла ППР (рассчитаны для структуры). Возможной причиной такого поведения является сильное поглощение в никеле (большая мнимая часть диэлектрической проницаемости). Проведённые численные эксперименты показали, что данное рассогласование отсутствует у мало поглощающих металлов (например, серебра), однако, несмотря на поглощение, никель сохраняет высокую эффективность связи красителя и ППП.

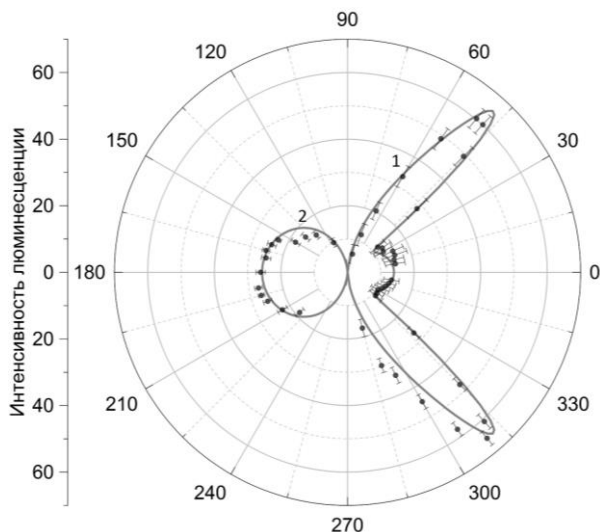


Рис. 1. Угловое распределение люминесценции для образца Ni 13 нм + SiO₂ 10 нм + PVC 30 нм, область 1 – связанная Р-люминесценция, область 2 – несвязанное и неполяризованное излучение

Список литературы

1. Lakowicz J.R. // Analytical Biochemistry. 2004. V. 324. P. 153-169.

А.И. ЧЕРНОВ^{1,2}, П.В. ФЕДОТОВ¹, Е.Д. ОБРАЗЦОВА^{1,3}¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*³*Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный*

ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ МОЛЕКУЛ ФТАЛОЦИАНИНА КОБАЛЬТА ПРИ ПОМЕЩЕНИИ ВНУТРЬ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Фталоцианины являются одним из ярких представителей органических полупроводников. Благодаря их физическим и химическим свойствам комплексы фталоцианинов нашли применение во многих областях в качестве газовых сенсоров, солнечных элементов, катализаторов, структурных элементов для оптоэлектроники и молекулярной спинтроники. Органические соединения фталоцианина состоят из четырех изоиндольных групп связанных между собой атомами азота. В центре соединения может быть помещен атом металла, что позволяет варьировать также их магнитные свойства. В данной работе одностенные углеродные нанотрубки выступают в качестве наноконтейнеров для молекул фталоцианина кобальта с целью создания композитного наноматериала. Проведено сравнение оптических свойств поглощения исходных соединений и материала после заполнения каналов нанотрубок. Обнаружено смещение пиков поглощения относящихся к соединению фталоцианина. Помимо этого заполнение влияет на оптические свойства самих нанотрубок. Продемонстрировано расширение спектрального диапазона поглощения наноразмерного материала.

A.I. CHERNOV^{1,2}, P.V. FEDOTOV¹, E.D. OBRAZTSOVA^{1,3}¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*³*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

OPTICAL ABSORPTION OF COBALT PHTHALOCYANINE MOLECULES ENCAPSULATED INSIDE SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES

Phthalocyanines are representatives of organic semiconductors that attract much attention. Due to their physical and chemical properties, phthalocyanine complexes have found application in many fields as gas sensors, solar cells, catalysts, key elements for optoelectronics, and molecular spintronics. Phthalocyanine organic compounds consist of four isoindole groups linked by nitrogen atoms. A metal atom can be placed in the center of the compound, which also makes it possible to vary their magnetic properties. In this work, single-walled carbon nanotubes act as nanocontainers for cobalt

phthalocyanine molecules in order to create a composite nanomaterial. A shift in absorption peaks related to the phthalocyanine compound has been detected upon filling the nanotube channels. In addition, the filling affects the optical properties of the nanotubes themselves. The broadening of the spectral absorption range of a nanomaterial has been demonstrated and allows gaining advantage in several applications.

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУН) могут быть заполнены различными типами молекул [1, 2]. При этом нанотрубки выступают в качестве поддерживающей матрицы для сформированных внутренних наноструктур (рис. 1а). При заполнении ОУН молекулами фталоцианина оптический отклик от молекулярного комплекса изменяется, происходит уширение пиков поглощения и сдвиг в красную область (рис. 1б). Причиной изменения спектральных характеристик может являться преобразование структуры объектов внутри каналов нанотрубок, схожее с формированием полос графена при полимеризации молекул коронена [2].

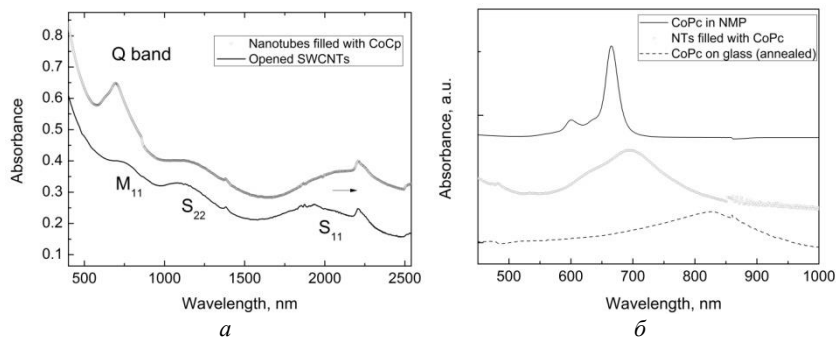


Рис. 1. Спектры оптического поглощения исходных (сплошная линия) и заполненных нанотрубок (открытые круги), Q полоса относится к комплексу фталоцианина (а); спектры оптического поглощения молекул фталоцианина кобальта внутри нанотрубок (открытые круги), молекул фталоцианина кобальта при аналогичных экспериментальных условиях, но без ОУН (прерывистая линия), молекулы фталоцианина кобальта в N-метил-2-пирролидоне (сплошная линия) (б)

Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-01099.

Список литературы

1. Fedotov P.V., Eremina V.A., Tonkikh A.A., Chernov A.I., Obratsova E.D. // Phys. Stat. Sol. B. 2016. V. 253 (12). P. 2004.
2. Chernov A.I., Fedotov P.V., Lim H.E., Obratsova E.D., et. al. // Nanoscale. 2018. V. 10 (6). P. 2936.

А.В. МЯГОТИН, Г.Д. ИВАНОВА

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ТЕРМОДИФФУЗИЯ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЖИДКОСТИ

Проанализирована двумерная термодиффузия в двухкомпонентной жидкофазной среде в поле пучка излучения с однородной интенсивностью. В результате точного аналитического решения задачи в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика двухкомпонентной среды.

A.V. MYAGOTIN, G.D. IVANOVA

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

LIGHT INDUCED THERMODIFFUSION IN TWO-COMPONENT LIQUID

The two-dimensional thermodiffusion in two-component in a uniform intensity Gaussian beam radiation field was analyzed. As a result of the exact analytical solution of the problem the expression for the two-component medium stationary thermal response is achieved.

Оптические методы диагностики материалов, основанные на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды, широко известны [1-3]. Например, метод тепловой линзы используется в термооптической спектрометрии, в оптической диагностике материалов [4-6]. В жидких двухкомпонентных средах термолинзовый отклик имеет свои особенности, поскольку кроме обычного теплового отклика, связанного с тепловым расширением среды, здесь могут возникать концентрационные потоки, обусловленные явлением термодиффузии (эффекта Соре) [3-7].

Целью данной работы является теоретический анализ термодиффузионного вклада в формирование линзы в двухкомпонентной среде под действием пучка излучения с равномерным профилем интенсивности в ограниченной кювете.

Рассмотрим двухлучевую термолинзовую схему: на кювету с двухкомпонентной средой (наножидкостью) падает опорный пучок с равномерным профилем интенсивности I_0 , формирующий температурное поле. Образованная в среде линза тестируется сигнальным гауссовым

пучком с другой длиной волны. Для определения величины термодиффузионной линзы рассмотрена система балансных уравнений, включающая уравнение теплопереноса и диффузии.

Для расчета термолинзового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [8]:

$$g_{st} = -\frac{2(z_1/l_0)\Phi_{nl}(0)}{(1+z_1^2/l_0^2)(1+3z_1^2/l_0^2)},$$

$$\Phi_{nl}(0) = I_0 L \alpha D_{thd} (\partial n / \partial C) / D_d,$$

где Z_1, Z_2 - расстояния от центра кюветы до перетяжки гауссова пучка и до экрана соответственно, $l_0 = \pi r_0^2 / \lambda$, r_0 - радиус перетяжки гауссова пучка, $\Phi_{nl}(0)$ - нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка, I_0 - интенсивность гауссова пучка, L - толщина слоя среды, α - коэффициент поглощения среды, D_{thd} и D_d - коэффициенты термодиффузии и диффузии соответственно, C - концентрация частиц дисперсной фазы, $\partial n / \partial C$ - параметр среды.

Таким образом, в работе получено выражение для стационарного термолинзового отклика двухкомпонентной среды, обусловленного термодиффузией. Результаты представляют интерес для термолинзовой спектроскопии [4], а также оптической диагностики многокомпонентных сред [8-10].

Список литературы

1. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Dholakia K., Wright E. // Optics Express. 2009. V. 17(12). P. 10277.
2. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2013. № 5. С. 112-115.
3. Vicary L. // Philosoph. Mag. B. 2002. V. 82(4). P. 447.
4. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 968042.
5. Wiegand S. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2004. V. 16. P. 357.
6. Ivanov V.I., Ivanova G.D. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 735. P. 012037.
7. Иванов В.И., Окишев К.Н., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И. // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 5. С. 23.
8. Сухоруков А.П. // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 5. С. 85.
9. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т. 52. № 12-3. С. 114.
10. Иванов В.И., Иванова Г.Д. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2016. № 8. С. 135-138.

А.В. ЕГОРЫШЕВА¹, Т.Д. ДУДКИНА, П.А. РЯБОЧКИНА²,
С.В. ГОЛОДУХИНА¹, С.А. ХРУЩАЛИНА², И.А. ЮРЛОВ²,
А.Д. ТАРАТЫНОВА²

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

¹*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва*

²*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ СО СТРУКТУРОЙ РОЗИАИТА

Синтезирован и структурно охарактеризован ряд сложных оксидов $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$, Ln = La-Tb, со структурой розиаита. Установлено, что РЗЭ ионы находятся в изолированных октаэдрах и расстояние между соседними ионами $> 5 \text{ \AA}$. На примере $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$, показано, что соединения имеют широкую область пропускания в видимом и ИК-диапазонах и характеризуются низкоэнергетическим фононным спектром. Перечисленные обстоятельства являются выгодными условиями для использования $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ в качестве матрицы люминофора. Исследованы спектрально-люминесцентные свойства твердых растворов $\text{Ln}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$.

A.V. EGORYSHEVA¹, T.D. DUDKINA, P.A. RYABOCHKINA²,
S.V. GOLODUKHINA¹, S.A. KHRUSHCHALINA², I.A. YURLOV²,
A.D. TARATYNOVA²

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

¹*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow*

²*Ogarev Mordovia State University, Saransk*

NEW OPTICAL MATERIALS BASED ON $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ COMPLEX OXIDES WITH ROSIAITE STRUCTURE

A series of complex oxides $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$, Ln = La-Tb, with rosielite structure, was synthesized and structurally characterized. It has been established that REE ions are located in isolated octahedra and the distance between neighboring ions is $> 5 \text{ \AA}$. Using the example of $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$, it was shown that the compounds have a wide transmission region in the visible and IR ranges and are characterized by a low-energy phonon spectrum. These circumstances are favorable conditions for $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ using as a phosphor matrix. The spectral-luminescent properties of $\text{Ln}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ solid solutions were studied

Интерес к Vi-содержащим соединениям со структурой типа пирохлора определяется широким спектром проявляемых ими функциональных

свойств. Ранее [1] нами было показано, что $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$ относится к семейству магнитно фрустрированных сложных оксидов висмута, в которых осуществляются антиферромагнитные взаимодействия ближнего порядка, а при низких температурах обнаружен переход в состояние спинового стекла. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является чувствительным методом для определения структурного разупорядочения, являющимся обязательным условием для формирования необычных спиновых состояний. Поэтому в настоящей работе в продолжение ранее начатого исследования мы приводим результаты изучения колебательных и оптических спектров твердых растворов $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$ со структурой пирохлора (рис. 1).

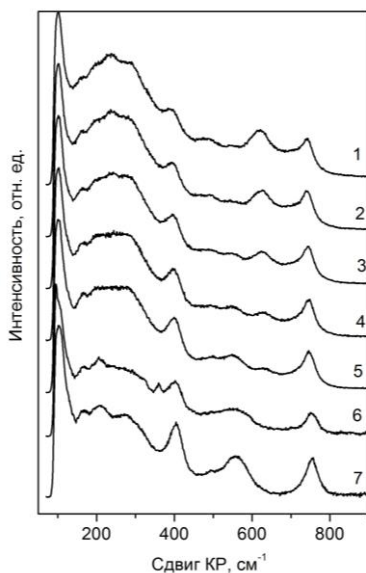


Рис. 1. КР-спектры твердых растворов $\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_{1.2(1-x)}\text{Ga}_{1.2x}\text{SbO}_7$ для $x = 0$ (1), 0.1 (2), 0.3 (3), 0.5 (4), 0.7 (5), 0.9 (6), 1.0 (7)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-12009 мк).

Список литературы

1. Egorysheva A.V., et. al. // J. Alloys Comp. 2019. V. 777. P. 655-662.

М.Г. ДРОНОВА, А.В. СЕМЕНЧА

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ СЕЛЕНА НА СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ ПОКРЫТИЙ $(As_{33}S_{33}I_{33})_{(1-x)}-Se_x$ ДЛЯ ИК-ДИОДОВ

Приведены результаты экспериментов по исследованию физико-химических и оптических свойств халькогенидных стекол $(As_{33}S_{33}I_{33})_{(1-x)}-Se_x$. Показано, что введение селена в систему As-S-I повышает устойчивость стекол во влажной среде, при этом, содержание селена более 80 мол. % повышает склонность стекла к кристаллизации. Установлено, что введение селена сдвигает край поглощения стекол в длинноволновую область спектра. Определено оптимальное соотношение компонентов стекла для использования в качестве линз ИК-диодов.

M.G. DRONOVA, A.V. SEMENCHA

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

INFLUENCE OF Se ON PROPERTIES OF $(As_{33}S_{33}I_{33})_{(1-x)}-Se_x$ GLASS FOR IMMERSION MID-IR LEDs LENSES

The results of study the physical, chemical and optical properties of chalcogenide glasses $(As_{33}S_{33}I_{33})_{(1-x)}-Se_x$ are presented. It has been shown that the introduction into the As-S-I of selenium more than 80 mol. % decreases the solubility of glasses in water. It has been demonstrated that the introduction of selenium shifts the absorption edge of glasses to the long-wavelength region of the spectrum. The optimal ratio of glass components for IR-LEDs lens has been determined.

Выпуск точных приборов газового анализа определяется качеством компонентов. В настоящее время нет идеального способа повысить КПД источников ИК-излучения. Один из способов – применение фокусирующих линз [1]. Халькогенидные стекла прозрачны во всем ИК-диапазоне и могут быть использованы в качестве линз для ИК-диодов, однако требуется детальное изучение свойств этих стекол. Известно стекло $As_{33}S_{33}I_{33}$ – оно устойчиво к кристаллизации, но растворимо в воде и не имеет практического применения. Один из главных компонентов ХС – селен имеет склонность к кристаллизации и высокую температуру плавления (300 °C) [2]. Таким образом, актуальной задачей является поиск оптимального соотношения этих двух компонентов.

Целью работы является экспериментальное изучение вклада селена на кристаллизационную устойчивость, растворимость и оптические свойства

стекла. Стекла синтезировали в вакуумированных кварцевых ампулах, помещенных в качающуюся печь. Нагрев печи проходил постепенно до температуры 600 °С. Растворимость стекла в воде оценивали по потере массы плоскопараллельных образцов. На рис. 1 показана зависимость края поглощения от концентрации селена. Склонность стекол к кристаллизации оценивали методом дифференциального термического анализа (ДТА). Зависимости ДТА показали, что увеличение содержания до 20 мол. % AsSI приводит к повышению кристаллизационной стойкости стекла. Установлено, что введение селена более 10 мол. % повышает устойчивость стекла в воде (рис. 2).

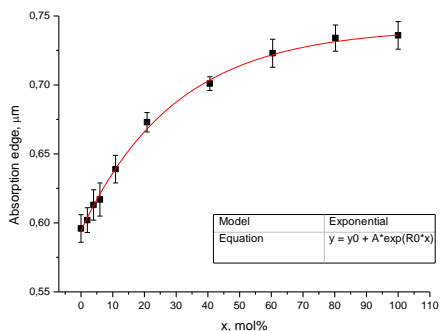


Рис. 1. Зависимость края поглощения от концентрации селена

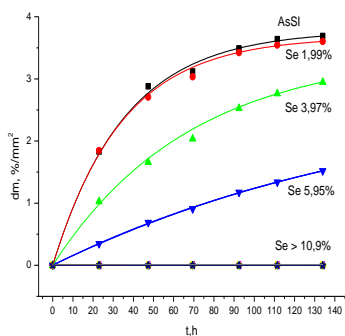


Рис. 2. Потеря массы образцов при растворении в воде

Список литературы

1. Markov V.A., Semencha A.V., et. al. Adhesive As-S-Se-I immersion lenses for enhancing radiation characteristics of mid-IR LEDs operating in wide temperature range // *Infrared Physics and Technology*. 2016. V. 78. P. 167-172.
2. Borisova Z.U. *Glassy Semiconductors*. Leningrad State University, 1981.
3. Molla A., Trafder A. Synthesis and characterization of low T_g As-S-I chalcogenide glass for processing of raw diamonds // *The Glass Age*. Part 2. 2017. P. 132-135.
4. Lin F.C., Ho S.M. Chemical durability of arsenic-sulfur-iodine glasses // *Jornal of the American ceramic society*. 1963.

М.В. ВАСИНА, С.Д. ЛАВРОВ, А.Ю. АВДИЖИЯН,
А.В. КУДРЯВЦЕВ, А.П. ШЕСТАКОВА, Е.Д. МИШИНА
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР, ОСНОВАННЫХ НА ДИХАЛЬКОГЕНИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Целью работы является изучение свойств экситонов в многослойных структурах для различных комбинаций дихалькогенидов переходных металлов. Ожидаемые результаты являются значительным вкладом в изучение особенностей зонных структур многослойных материалов и их межслойных экситонов.

M.V. VASINA, S.D. LAVROV, A.Yu. AVDIZHIYAN,
A.V. KUDRYAVTSEV, A.P. SHESTAKOVA, E.D. MISHINA
MIREA – Russian Technological University, Moscow

RESEARCH OF THE OPTICAL PROPERTIES IN MULTILAYER SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES BASED ON TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES

The aim of the work is to study the properties of excitons in multilayer structures for various combinations of transition metal dichalcogenides. The expected results are a significant contribution to the study of the features of band structures of multilayer materials and on them of interlayer excitons.

Двумерные графеноподобные материалы обладают необычными электрическими и оптическими свойствами, что делает их перспективными для использования в нано- и микроэлектронике. Одним из типов двумерных материалов является класс дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). Химическая формула MX_2 , где М - переходный металл (Mo, W, Ti, Pt, Pd), а X - халькоген (S, Se). Эти соединения обладают полупроводниковыми свойствами с небольшим числом атомных слоев, что делает важным изучение свойств таких тонких структур.

На сегодняшний день существует ряд исследований, показывающих возможность использования многослойных структур дихалькогенидов переходных металлов в качестве вертикальных полевых транзисторов [1].

Эта возможность обусловлена высокой подвижностью носителей заряда между слоями ДПМ. Также в многослойных структурах наблюдается появлением межслойных экситонов, время жизни которых превышает время жизни таких в отдельных монослоях ДПМ. Для межслойных экситонов время жизни составляет около 1,8 нс [2], тогда как для межслойных экситонов оно составляет до 10 пс, что может быть полезно для создания лазеров, светоизлучающих диодов и фотогоальванических устройств.

Кроме того, одними из перспективных типов материалов являются многослойные структуры, состоящие из слоев разных ДПМ [3]. Образцы многослойной структуры ДПМ были впервые получены в 2016 году. В то же время впервые были получены экспериментальные данные по спектральным характеристикам этого класса веществ. Результаты фотолюминесцентной спектроскопии показали наличие нового типа экситона - межслойного экситона. Из-за новизны многослойных структур, основанных на разных ДПМ, сегодня нет моделей, описывающих физические явления, происходящие в этих материалах, что очень важно для решения данной задачи [4].

Работа поддержана российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-32-20047).

Список литературы

1. Ceballos F., et al. Ultrafast charge separation and indirect exciton formation in a MoS₂-MoSe₂ van der Waals heterostructure // ACS Nano. 2014. V. 8. № 12. P. 12717–12724.
2. Rivera P. et al. Observation of long-lived interlayer excitons in monolayer MoSe₂-WSe₂ heterostructures // Nat. Commun. 2015. V. 6. P. 6242.
3. Thygesen K.S. Calculating excitons, plasmons, and quasiparticles in 2D materials and van der Waals heterostructures // 2D Mater. 2017. V. 4. № 2. P. 22004.
4. Britnell L., et al. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures // Science. 2012. V. 335. № 6071. P. 947–950.

Г.М. КРИВОВА, Д.А. КОМИССАР, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ,
Ю.В. СТЕБУНОВ, А.В. АРСЕНИН

Московский физико-технический институт, Долгопрудный

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ГРАФЕНА МЕТОДОМ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В работе описана методика получения пленок оксида графена толщиной менее 60 нм и среднеквадратичной шероховатостью 5 нм на кремниевой подложке с помощью воздушно-капельного распыления суспензии чешуек оксида графена.

G.M. KRIVOVA, D.A. KOMISSAR, D.I. YAKUBOVKY,
Yu.V. STEBUNOV, A.V. ARSEININ

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

THIN GRAPHENE OXIDE FILMS DEPOSITION USING SPRAYCOATING TECHNIQUE

The article describes a spray coating method of obtaining graphene oxide thin films with a thickness less than 60 nm and a root-mean-square roughness of 5 nm on a silicon substrate.

Воздушно-капельное распыление является быстрым, дешевым, не требующим применения вакуумной техники либо инертной атмосферы способом получения тонких диэлектрических пленок [1, 2]. Этот способ позволяет контролировать толщину пленок посредством подбора концентрации раствора, изменения давления рабочего газа или изменения расстояния до подложки, на которую производится напыление.

Целью данной работы являлась отработка методики напыления диэлектрических пленок оксида графена толщиной от 2 до 100 нм для дальнейшего исследования их оптических свойств. В процессе работы исследовано влияние различных факторов (температура подложки, скорость напыления и концентрация суспензии оксида графена) на качество получаемых пленок.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, основными элементами которой являются аэрограф и нагревательная плитка. Подложкой является кремниевая пластина со слоем оксида кремния толщиной около 285 нм, которая предварительно очищалась в

ультразвуковой ванне в спирте и дистиллированной воде, а также обрабатывалась кислородной плазмой высокочастотного газового разряда низкого давления для улучшения смачиваемости поверхности подложки.

Напыление производилось при давлении рабочего газа (Ar/N_2) 2 атм. В процессе напыления температура подложки поддерживалась на уровне $130\text{ }^\circ\text{C}$. Концентрации напыляемых суспензий составляли 50 и 150 мг/л (характерный латеральный размер чешуек оксида графена 0,3-0,7 мкм).

Структура поверхности полученных плёнок изучалась с помощью оптического микроскопа с увеличением $\times 10$, $\times 50$ и $\times 100$ и атомно-силового микроскопа (АСМ) (рис. 2). Для всех плёнок определены однородность, толщина и шероховатость. Толщины полученных плёнок варьировались от 2 нм до 100 нм с шероховатостью (RMS) от 1,5 до 7 нм. Исследована зависимость структуры поверхности плёнок от концентрации раствора и температуры подложки (от 70 до $200\text{ }^\circ\text{C}$).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-29-03432 и № 18-07-01379.

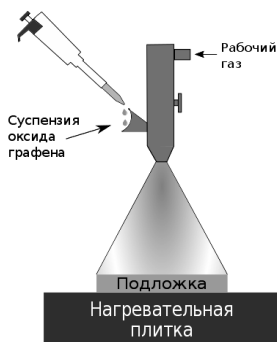


Рис. 1. Схема установки напыления

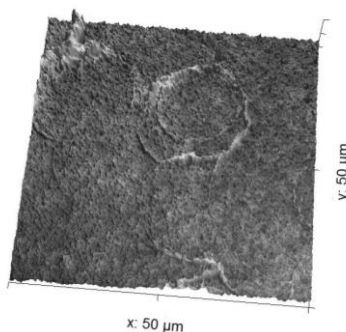


Рис. 2. Карта высот плёнки оксида графена на кремниевой подложке (АСМ)

Список литературы

1. Giroto C., et al. // *Advanced Functional Materials*. 2011. V. 21. P. 64.
2. Stebunov Yu. V., et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. V. 7 (39). P. 21727-21734.

Н.Р. РОМАНОВ^{1,2}, Ф.И. ЗОЛОТОВ^{1,2,3}, К.В. СМИРНОВ^{1,2,3}

¹*Московский педагогический государственный университет*

²*ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва*

³*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

СОЗДАНИЕ РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ УЛЬТРАТОНКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК НИТРИДА ВАНАДИЯ

В работе приведены результаты создания и исследования сверхпроводниковых пленок нитрида ванадия VN толщиной ~ 10 нм с разной степенью разупорядоченности. Показано, что и температура кремниевой подложки T_{sub} в процессе магнетронного осаждения пленки, и давление в камере P влияют на критическую температуру сверхпроводящего перехода осаждаемых пленок T_c и на отношение R_{300}/R_{20} , определяющее их степень разупорядоченности. Получены VN пленки, перспективные для создания на их основе сверхпроводниковых одноквантовых детекторов.

N.R. ROMANOV^{1,2}, P.I. ZOLOTOV^{1,2,3}, K.V. SMIRNOV^{1,2,3}

¹*Moscow State Pedagogical University*

²*LLC «Superconducting Nanotechnology», Moscow*

³*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

DEVELOPMENT OF DISORDERED ULTRA-THIN SUPERCONDUCTING VANADIUM NITRIDE FILMS

We present the results of development and research of superconducting vanadium nitride VN films ~ 10 nm thick having different level of disorder. It is showed that both silicon substrate temperature T_{sub} in process of magnetron sputtering and total gas pressure P affect superconducting transition temperature of sputtered films and R_{300}/R_{20} ratio defining their level of disorder. VN films suitable for development of superconducting single-photon detectors on their basis are obtained.

В 2001 году авторами [1] были представлены первые результаты создания сверхпроводниковых детекторов одиночных фотонов на основе ультратонких пленок нитрида ниобия NbN с $T_c \sim 9-10$ К. В настоящее время такие детекторы позволяют регистрировать одиночные фотоны в ближней ИК-области с квантовой эффективностью более 90 %, гигагерцовой скоростью счета, пикосекундным временным разрешением [2, 3]. Для продвижения SSPD в средний и дальний ИК диапазоны необходимо использование сверхпроводниковых пленок с меньшим

значением T_c и высокой степенью разупорядоченности [3], которая коррелирует с критической температурой и с отношением поверхностных сопротивлений R пленки при 300 К и при 20 К (R_{300}/R_{20}).

Нами был поставлен процесс реактивного магнетронного осаждения пленок VN в смеси газов Ag и N_2 и исследована корреляция T_c и R_{300}/R_{20} от давления в камере и от температуры подложки в процессе осаждения (см. табл. 1). Результаты измерения зависимостей поверхностного сопротивления пленок от температуры $R(T)$, осажженных при разных T_{sub} и P представлены на рис. 1.

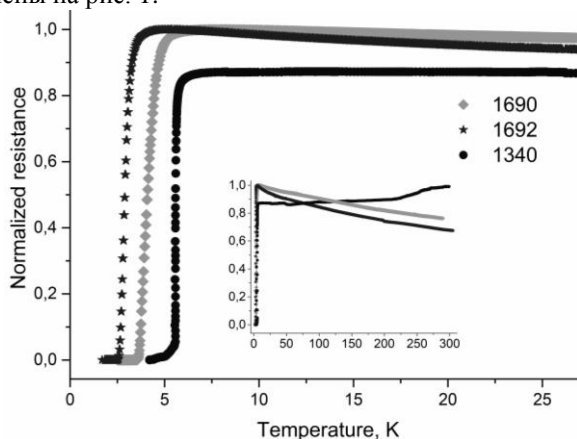


Рис. 1. Зависимости $R(T)$ для трех пленок VN (№ 1690, 1692, 1340)

Таблица 1. Параметры исследуемых пленок

№ пленки	T_{sub}, K	$P, mTorr$	T_c, K	R_{300}/R_{20}
1340	773	3	5,8	1,16
1690	300	6	4,1	0,82
1692	300	8	3,0	0,69

Представленные результаты свидетельствуют, что T_{sub} и P существенно влияют на T_c образцов и на степень их разупорядоченности. Полученные пленки VN с $T_c = 3.0$ К и $R_{300}/R_{20} = 0,69$ перспективны для создания на их основе высокоэффективных однофотонных детекторов средней ИК области.

Список литературы

1. Gol'tsman G., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 6.
2. Shchslavskiy V., et. al. // Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. P. 053117.
3. Smirnov K., et. al. // Superconducting Science and Technology. 2018. V. 31. P. 3.

Е.А. АНТОНОВ, А.И. КАЛУГИН, А.Г. ПОНОМАРЕВ
Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашиникова

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ГРАФИТА ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО FeCl₃

В работе проведены расчеты полного комплекса оптических функций графита интеркалированного FeCl₃. Результаты получены с помощью экспериментальных спектров характеристических потерь для разных значений волнового вектора электронов. Выполнен анализ зависимости оптических свойств от волнового вектора.

E.A. ANTONOV, A.I. KALUGIN, A.G. PONOMAREV
Kalashnikov Izhevsk State Technical University

OPTICAL SPECTRA OF FeCl₃-INTERCALATED GRAPHITE

In the paper the calculations of complete set of optical properties are carried out for the FeCl₃-intercalated graphite. The results were obtained using experimental spectra of electron energy-loss for different wave vectors. The analysis of the dependence of optical properties on the wave vector are performed.

Соединения интеркалированного графита представляют огромный интерес из-за их высокой электропроводности и новой кристаллической структуры. Для детального обсуждения свойств материала необходимо знание его электронной структуры. Наиболее полная и точная информация об электронной структуре содержится в оптических спектрах (спектры отражения, поглощения, диэлектрической проницаемости, показателя преломления и других функций [1]). В случае возбуждения поперечных компонент происходят только прямые переходы без изменения волнового вектора электрона, так как фотон обладает очень малым импульсом. Продольные не прямые переходы возбуждаются потоком быстрых электронов с интенсивностью, сравнимой с интенсивностью прямых поперечных переходов. Таким образом, можно получить дополнительную информацию о дисперсии энергетических зон кристалла.

В работе [2] экспериментально были измерены спектры характеристических потерь энергии электронов графита интеркалированного FeCl₃ в зависимости от значений переданного волнового вектора электронов в интервале $0.1 \div 0.56 \text{ \AA}^{-1}$. На основе спектров характеристических потерь энергии электронов были

рассчитаны спектры полного комплекса оптических функций (коэффициент отражения R , реальная ϵ_1 и мнимая ϵ_2 части диэлектрической постоянной (рис. 1), показатели преломления n и поглощения k , коэффициент поглощения α и др.).

С увеличением переданного волнового вектора происходит уменьшение интенсивности всех спектров комплекса оптических функций, а также появление дополнительных структур, которые не проявлялись при малых значениях q . В результате анализа полученных данных установлены основные особенности спектров продольных не прямых переходов графита интеркалированного FeCl_3 для значений переданного волнового вектора потока электронов $q = 0.1 \div 0.56 \text{ \AA}^{-1}$. Они содержат новую информацию о дисперсии зон проводимости относительно валентных зон, которая дополняет известные сведения о зонах, получаемых по оптическим экспериментальным спектрам отражения. Также спектры интеркалированного графита были сопоставлены со спектрами чистого графита [3] для аналогичных значений переданного волнового вектора.

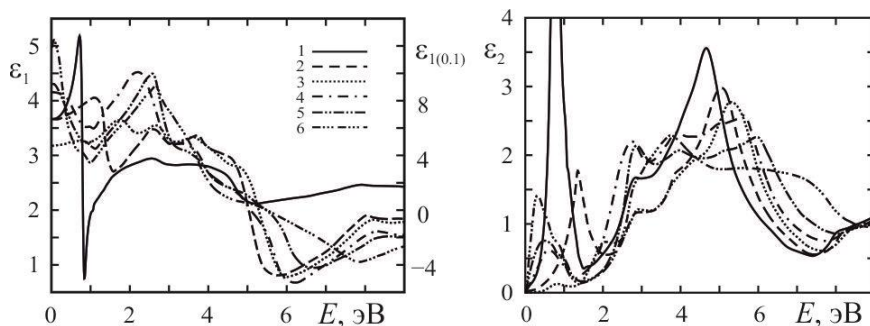


Рис. 1. Спектры ϵ_1 (слева), ϵ_2 (справа) графита интеркалированного FeCl_3 для шести значений переданного волнового вектора $q = 0.1$ (1), 0.21 (2), 0.28 (3), 0.35 (4), 0.42 (5), 0.56 \AA^{-1} (6)

Список литературы

1. Соболев В.В. Оптические свойства и электронная структура кристаллов. Том I. Введение в теорию. Москва-Ижевск: Иж.ИКИ, 2012.
2. Ritsko J.J., Rice M.J. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 42. P. 666.
3. Соболев В.В., Антонов Е.А., Соболев В.В. // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 9. С. 1206.

П.А. ЧИЧЕВА, К.С. ЛЕВЧЕНКО, К.А. ЧУДОВ, Н.О. ПОРОШИН,
П.С. ШМЕЛИН¹, Е.П. ГРЕБЕННИКОВ¹

МИРЭА – Российский технологический университет», Москва
¹АО «ЦНИТИ «Техномаш», Москва

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОСФЕР, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОХРОМНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

В настоящей работе описан синтез полимерных микросфер, модифицированных электрохромными соединениями класса виологенов, исследованы электрохимические свойства модифицированных микросфер. На основе модифицированных микросфер создано электрохромное устройство, и определены параметры его работы.

P.A. CHICHEVA, K.S. LEVCHENKO, K.A. CHUDOV,
N.O. POROSHIN, P.S. SHMELIN¹, E.P. GREBENNIKOV¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow
¹JSC «TECHNOMASH», Moscow

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF POLYMERIC MICROSPHERES MODIFIED WITH ELECTROCHROMIC COMPOUNDS

In the present work the synthesis of viologen modified polymer microspheres is described, and the electrochemical properties of modified microspheres were investigated. An electrochromic device was created on the basis of modified microspheres, and its functional parameters were determined.

Полимерные микросферы находят широкое применение в научных исследованиях, медицине, биомедицинских анализах, фармацевтических препаратах и электронике благодаря возможности модификации их поверхности функциональными молекулами различной природы. Использование микросфер в составе электрохромных устройств позволяет улучшить ряд их ключевых параметров. Так, снижается диффузия электрохромных соединений из приэлектродного пространства, приводящая к нежелательному обесцвечиванию на рабочем или окрашиванию на противоэлектроде. Благодаря оптическим свойствам сферы придают устройству непрозрачный фон [1]. Модифицированные

электрохромами полимерные микросферы могут найти свое применение в дисплеях, умных окнах, отображающих устройствах и многом другом.

В работе использовали полистирольные микросферы с хлорметильными группами размером 4 мкм, полученные методом затравочной полимеризации. Модификацию микросфер проводили в этаноле гексафторфосфатом метилвиологена, по реакции нуклеофильного замещения в соотношении 1:1,5. Был проведен вольтамперметрический анализ модифицированных микросфер и диметилвиологена гексафторфосфата (рис. 1).

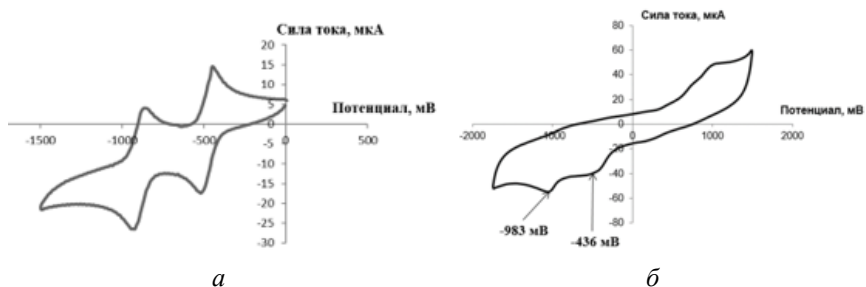


Рис. 1. Вольтамперограммы диметилвиологена гексафторфосфата (а) и модифицированных им микросфер (б)

На основе модифицированных микросфер было изготовлено электрохромное устройство. Для его создания были использованы прозрачные электроды на основе оксида индия-олова на гибкой ПЭТ подложке. Было установлено, что изменение окраски ячейки происходило под действием напряжения в 2 В.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности дальнейшего изучения полимерных микросфер, модифицированных электрохромными соединениями, и их использования в составе электрохромных устройств.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках Соглашения 14.577.21.0273 от 26.09.2017. Уникальный идентификатор RFMEF157717X0273.

Список литературы

1. Yap F.L., Zhang Y. // Assembly of polystyrene microspheres and its application in cell micropatterning // Biomaterials. 2007. V. 28. Is. 14. P. 2328-2338.

А.Ю. АВДИЖИЯН, С.Д. ЛАВРОВ, А.П. ШЕСТАКОВА
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

СВОЙСТВА ЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В ТВЁРДЫХ РАСТВОРАХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В данной работе представлены результаты исследования экситонных 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
MIREA – Russian Technological University, Moscow

EXCITON STATES PROPERTIES OF TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METAL DICHALCOGENIDES ALLOYS

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

На данный момент двумерные графеноподобные материалы являются многообещающим классом веществ для создания совершенно новых устройств нано- и оптоэлектроники. Монослои дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), химическая формула которых MX_2 , где $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}, \text{Ti}$; $\text{X} = \text{S}, \text{Se}$ имеют прямую запрещенную зону шириной от 1.2 до 2 эВ. На сегодняшний день уже существует большое количество статей, посвященных образцам устройств на основе данных материалов (фототранзисторы, газовые сенсоры, светоизлучающие устройства).

Для создания оптоэлектронных устройств с широким спектром рабочих длин волн [1] необходимо изменять ширину запрещенной зоны в используемом материале. Ширину запрещенной зоны можно изменить методом изменения взаимной концентрации химических элементов в образце дихалькогенида переходного металла [2]. В ходе работы были получены образцы $\text{Mo}_{1-x}\text{W}_x\text{S}_{1-y}\text{Se}_y$ с концентрациями x и y от 0 до 1.

Наличие прямой запрещенной 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 фото-откликом 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.

Список литературы

1. Splendiani A., et al. Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS_2 // *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 $\text{MoS}_2(1-x)\text{Se}_{2x}$ 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 $\text{WS}_2(1-x)\text{S}_{2x}$ 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 // *Applied Materials & Interfaces.* 2016. V. 8. № 20. P. 12915–12924.

Н.Ж. ЖЕЕНБАЕВ, Г.Д. ДОРЖУЕВА, А.М. НУРСЕИТОВА

*Институт физико-технических проблем и материаловедения
им. акад. Ж. Жеенбаева НАН Кыргызской Республики, Бишкек*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗОЛОТА МЕТОДОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В ДВУХСТРУЙНОМ ПЛАЗМАТРОНЕ

Методом сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа определено содержание золота при вводе пробы в поток плазмы двухструйного плазматрона ДГП-50М. Показаны возможности существенного увеличения предела обнаружения содержания вещества методом сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа.

N.J. JEENBAEV, G.D. DORJUEVA, A.M. NURSEITOVA

*Academician J. Jeenbaev Institute of Physical & Technical Problems and Materials
Science of the NAS of the Kyrgyz Republic. Bishkek*

GOLD CONCENTRATION DETERMINATION BY THE METHOD OF SCINTILLATION ANALYSIS IN TWO-JETS PLASMATRON

Using sample injection in the plasma flow of two-jets plasmatron DGP-50M gold content was determined by the method of scintillation atomic-emission analysis. Possibilities of significant increasing of the matter content's detection threshold using the method of scintillation atomic-emission analysis are shown.

Для определения малых содержаний золота и других благородных металлов в рудах и минералах эффективным является применение сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа (САЭА), позволяющего значительно увеличить пределы чувствительности по сравнению с традиционным атомно-эмиссионным спектральным методом анализа [1, 2]. Для реализации метода САЭА требуется обеспечение необходимой интенсивности и длительности эмиссионного импульса, которые пропорциональны количеству атомов, высвечиваемых при возбуждении; скорости испарения частицы; времени нахождения частицы в плазме. Таким требованиям соответствует использование двухструйного плазматрона ДГП-50М, обладающего большой мощностью, протяженностью разрядной зоны, прямой подачей пробы в поток плазмы,

оснащенного спектральными приборами высокой разрешающей силы и регистрационной системой на базе фотоэлектронных кассет [3].

Измерения содержания золота в пробах методом скintилляционного анализа проводились в потоке плазмы ДГП-50М при силе тока $I = 50-55\text{А}$. Расход плазмообразующего газа (аргон) составлял $G = 2.5\text{ л/мин}$. Излучение от приосевых участков разряда через однолинзовую систему освещения фокусировалось на всю высоту щели ($H = 15\text{ мм}$) спектрографа. Автоматизированная регистрация спектров проводилась на базе спектрографа ДФС-13-2 (600 штр./мм) с фотоэлектронной кассетой фирмы «МОРС» с 9 ПЗС. Экспозиция фотоэлектронной кассеты 50 мс, количество регистрируемых кадров – 2000. Подавалась порошкообразная проба весом 1.025 г (использовался стандартный образец с паспортным содержанием золота 0.00205 %). Общий вид участка спектра с линией золота Au I 267.595 нм представлен на рис. 1.

Апробация метода скintилляционного атомно-эмиссионного анализа показала возможность уменьшения пределов обнаружения на один-два порядка величины.

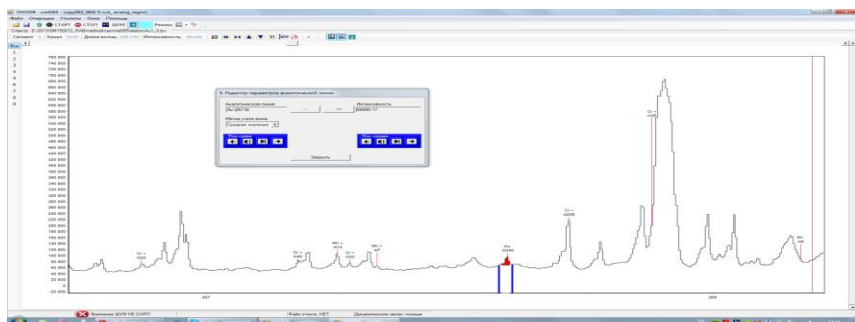


Рис. 1. Участок спектра с линией Au 267.59 нм

Список литературы

1. Zayakina S.B., Anoshin G.N., et. al. // Zavodskaya laboratoria. Diagnostika materialov. 2007. V. 73 (special edition). P. 100-106.
2. Vasileva I.E., Shabanova E.V., et. al. // Analitika I kontrol'. 2010. V. 14 (4). P. 201-213.
3. Jeenbaev N.J., Silkis E.G. // Izvestia NAN KR. 2013. V. 3. P. 17-21.

А.М. МАШКО^{1,2}, А.А. МЕЙСТЕРСОН^{1,3},
А.Е. АФАНАСЬЕВ¹, П.Н. МЕЛЕНТЬЕВ¹, В.И. БАЛЫКИН¹

¹*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва*

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

СПЕКТРОСКОПИЯ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ПОЛЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В работе приведены результаты исследования спектральных свойств атомов, локализованных в поле излучения импульсного лазера с длительностью импульса от 100 фс до 1 пс. Представлены результаты сравнения спектров атомов рубидия, локализованных в импульсной ловушке, и в ловушке, образованной непрерывным лазерным излучением.

A.M. MASHKO^{1,2}, A.A. MEYSTERSON^{1,3}, A.E. AFANASIEV¹,
P.N. MELENTIEV¹, V.I. BALYKIN¹

¹*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny*

SPECTROSCOPY OF COLD ATOMS LOCALIZED BY A FEMTOSECOND PULSED LASER FIELD

This work presents the results of studying the spectral properties of atoms localized in the field of a pulsed laser with a pulse duration from 100 fs to 1 ps. The results of a comparison of the spectra of rubidium atoms localized in a pulsed trap and in a trap formed by continuous laser radiation are presented.

Атомные дипольные ловушки играют важную роль в фундаментальных исследованиях и имеют множество прикладных аспектов для создания оптических атомных часов и экспериментов в области квантовой информатики [1]. В основном дипольные ловушки для нейтральных атомов формируются с использованием излучения непрерывных лазеров. Фактором, который ограничивает использование дипольных ловушек, является переменный эффект Штарка [2],

приводящий к сдвигу и неоднородному уширению измеряемых спектральных линий локализованных атомов.

Ранее было предложено использовать для локализации атомов импульсное лазерное излучение с фемтосекундной длительностью импульса [3, 4]. В этом случае временной интервал, в течение которого атом находится в лазерном поле, составляет всего 10^{-7} - 10^{-8} от полного времени локализации. Таким образом, атом остается свободным более 90 % времени локализации, что позволит разработать схемы с минимальным возмущением атомных уровней локализующим потенциалом.

Долгое время данный подход лежал исключительно в области теоретических исследований. Экспериментальная локализация атомов в импульсном поле была ограничена длительностью 1 пс [5]. Наиболее распространенным мнением, объясняющим отсутствие локализации при использовании фемтосекундного излучения, являлась большая спектральная ширина фемтосекундного импульса, приводящая к интенсивным процессам фотоассоциации атомов.

Недавно нами было продемонстрировано [6], что основным процессом, ограничивающим локализацию атомов в импульсном поле фемтосекундной длительности является процесс импульсной диффузии, а не фотоассоциации. Это позволило определить оптимальные параметры лазерного поля с длительностью импульса 100 фс для осуществления эффективной экспериментальной локализации атомов.

В данной работе экспериментально исследованы спектральные свойства атомов, локализованных в поле излучения импульсного лазера с длительностью импульса от 100 фс до 1 пс. В докладе будут представлены результаты сравнения спектров атомов рубидия, локализованных в импульсной ловушке, и в ловушке, образованной непрерывным лазерным излучением. Произведенные исследования открывают возможность к поиску условий, при которых эффекты, связанные со сдвигом спектральной линии атома, локализованного в дипольной ловушке, минимальны.

Список литературы

1. Grimm R., et. al. // Adv. At. Mol. Opt. Phys. 2000, V. 42. P. 95.
2. Metcalf H.J., Van der Straten P. // New York: Springer, 1999.
3. Balykin V.I. // JETP Letters. 2005. V. 81. P. 209.
4. Yanyshv D.N., et. al. // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. P. 033411.
5. Clarke R.B.M., et. al. // Appl. Phys. B. 2000. V. 70. P. 695.
6. Afanasiev A.E., et. al. // Proceedings of 8th International Symposium "Modern Problems of Laser Physics". 2018. P. 27.

В.С. МАКИН, Е.И. ЛОГАЧЕВА, Р.С. МАКИН¹

*Институт ядерной энергетики, Сосновый Бор, Ленинградская обл.,
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ИЕРАРХИЯ УПОРЯДОЧЕННОГО РЕЗОНАНСНОГО РЕЛЬЕФА ZnO ПОД ДЕЙСТВИЕМ УКИ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В рамках универсальной поляритонной модели интерпретированы результаты экспериментальных работ по формированию иерархических упорядоченных структур разрушения поверхности ZnO под действием УКИ импульсов излучения.

V.S. MAKIN, E.I. LOGACHEVA, R.S. MAKIN¹

*Nuclear Engineering Institute, Sosnovy Bor, Leningrad region
¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

ZnO ORDERED RESONANT RELIEF HIERARCHY UNDER THE ULTRASHORT PULSES OF LINEAR POLARIZED LASER RADIATION

Within universal polariton model the results of experimental works on formation of hierarchical ordered structures of a surface damage under the ultrashort laser pulses are interpreted.

Механизм образования упорядоченных структур на поверхностях и в объеме прозрачных диэлектриков под действием ультракороткоимпульсного (УКИ) лазерного излучения остается открытым. Для таких диэлектриков как кристаллы и тонкие пленки ZnO считается, что структуры с $\mathbf{g}||\mathbf{E}$ и периодом $d \leq \lambda$ формируются в результате интерференции поверхностных плазмон поляритонов (ППП) с возбуждающей их падающей волной лазерного излучения (ЛИ). Здесь \mathbf{E} - тангенциальная компонента вектора напряженности электрического поля ЛИ. Причины образования структур с иными характеристиками, в том числе с $\mathbf{g}||\mathbf{E}$ и $\mathbf{G}\perp\mathbf{E}$, остаются дискуссионными. В большинстве опубликованных работ рассматривают образование структур с $\mathbf{g}||\mathbf{E}$ и $d = (630 \div 730) \text{ нм} < \lambda$ ($\lambda = 800 \text{ нм}$) при $Q \sim (0,7 \div 0,8) \text{ Дж/см}^2$ как результат интерференции ЛИ с возбуждаемыми им ППП [1, 2]. Механизм образования структур с $d \ll \lambda$ ($\mathbf{g}||\mathbf{E}$, $d \leq (200 \div 280) \text{ нм}$, $\lambda = 800 \text{ нм}$) не известен.

В универсальной поляритонной модели (УПМ) и нелинейной математической модели образования пространственных периодов структур их появление описывается в рамках порядка Шарковского [3] и $d = \lambda/3\eta \sim (200\div 280)$ нм [2].

В недавней работе [1] помимо структур с $\mathbf{g}\|\mathbf{E}$ обнаружены структуры $\mathbf{G}\perp\mathbf{E}$ и $d \ll \lambda$. Их особенность состоит в том, что сначала формируются структуры нормальной ориентации $\mathbf{g}\|\mathbf{E}$, а с ростом числа импульсов излучения N на их вершинах образуются структуры $\mathbf{G}\perp\mathbf{E}$ аномальной ориентации и периодом $d = \lambda/2k\xi = 800/(2k\xi) \approx 100$ нм, где $k = 4$, $\xi \geq 1$ (рис. 1). Их образование обусловлено взаимной интерференцией клиновых ППП (КППП), возбуждаемых падающим излучением на гребнях основного рельефа (\mathbf{g}) и распространяющихся навстречу друг другу [4]. В качестве доказательства последней модели можно интерпретировать эксперимент [1] по возбуждению КППП при ориентации поля ЛИ вдоль штрихов ($\mathbf{g}\perp\mathbf{E}$) заранее созданной дифракционной решетки \mathbf{g} . При этой ориентации поля падающей волны эффективность возбуждения КППП будет максимальной, что приведет к интерференции с высоким контрастом и образованию решеток наноструктур \mathbf{G} (рис. 2) [1]. Заметим, что дополнительно наблюдается структурирование решетки \mathbf{G} , хорошо видное на рис. 1, т.е. процесс носит явно иерархический характер. Наблюдавшиеся в экспериментах ориентированные поляризацией лазерного излучения субволновые структуры разрушения на поверхности ZnO хорошо объясняются в рамках УПМ.

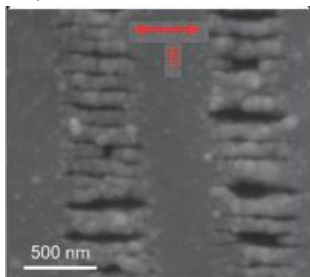


Рис. 1. Наблюдаемые структуры

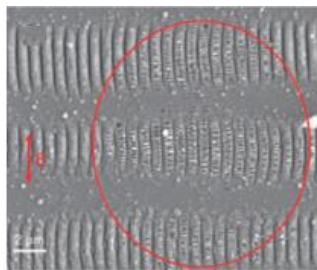


Рис. 2. Интерференционные решётки

Список литературы

1. Dufft D., Rosenfeld A., et. al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 034908.
2. Han J.W., Hu J., Li X., Wang Q., Lu Y. // Appl. Phys. Express. 2018. V. 11. P. 052703.
3. Макин В.С., Макин Р.С., Воробьев А.Я., Гуо Ч. // Сб. статей «Нелинейность в современном естествознании» / под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Изд. ЛКИ, 2009. С. 309.
4. Макин В.С., Логачева Е.И. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 4. С. 641-646.

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С УЧАСТИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ

Теоретически исследована релаксация возбуждений сферической квантовой точки (КТ) вблизи плоской проводящей поверхности, сопровождающаяся рождением поверхностного плазмона. Для квантовой точки в режимах сильного и слабого конфайнмента рассчитаны скорости межзонных и экситонных переходов, соответственно. Показано, что при определенных геометрических параметрах системы скорости рассмотренных процессов превосходят скорость излучательной рекомбинации электрона и дырки.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

ENERGY RELAXATION OF QUANTUM DOTS WITH THE INVOLVEMENT OF SURFACE PLASMONS

The relaxation of excitations in spherical quantum dot (QD) near a plane conducting surface, accompanied by the birth of the surface plasmon, was theoretically studied. Rates of interband and exciton transitions for the quantum dot in regimes of the strong and weak confinement were calculated, respectively. It is shown that under certain geometrical parameters of the system rates of the considered processes exceed the rate of the radiative recombination of electron and hole.

Взаимодействие электронов квантовой точки с электрическим полем поверхностного плазмона может приводить к переходам электрона между различными состояниями. В условиях сильного пространственного ограничения движения электрона в КТ для скорости межзонного перехода, который сопровождается рождением поверхностного плазмона, получено следующее выражение

$$U_{vc} = \frac{e^2 r_{vc}^2 k_0}{3\hbar} \left(1 + k_0^2 / k_z^2\right) \left| \int d\omega / dk \Big|_{k=k_0}^{-1} \int d\alpha \left| \int \psi_{n'l'm'}^*(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, k_0) \psi_{nlm}(\mathbf{r}) dV \right|^2 \right. , \quad (1)$$

где интегрирование ведется по объему КТ и по углу α , задающему направление волнового вектора плазмона. Здесь k_0 – волновое число плазмона, соответствующее частоте перехода; ω – частота плазмона; k_z – коэффициент, определяющий быстроту спада напряженности электрического поля плазмона по мере удаления от поверхности;

er_{vc} – дипольный матричный элемент перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону. В (1) $\psi_{nlm}(\mathbf{r})$ – огибающая функция, являющаяся волновой функцией частицы в центрально-симметричной прямоугольной яме с бесконечно высокими стенками [1], а также использовано обозначение $E(\mathbf{r}, k_0) = \sqrt{\omega(k_0)/L(k_0)} e^{-k_x(d+r\cos\theta)} e^{ik_0r\sin\theta\cos(\varphi-\alpha)}$.

Для квантовой точки в режиме слабого конфайнмента скорость перехода из экситонного состояния в основное имеет вид

$$U_{ex} = \frac{e^2 r_{vc}^2 k_0 \Phi_{n00}^2(0)}{3\hbar} \left(1 + k_0^2/k_z^2\right) d\omega/dk|_{k=k_0}^{-1} \int d\alpha \left| \int \psi_{nlm}(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}, k_0) dV \right|^2, \quad (2)$$

где $\Phi_{n00}(0)$ – водородоподобная функция относительного движения электрона и дырки.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов скоростей межзонного (1) и экситонного (2) переходов в КТ вблизи серебряной подложки, которые демонстрируют существенную зависимость указанных скоростей от геометрических параметров системы. Расчеты были проведены для состояний, характеризуемых квантовыми числами $n = 1, l = 0, m = 0$. Из рис. 1 видно, что скорость межзонного перехода спадает с ростом радиуса КТ, а скорость экситонного перехода – растет. С ростом расстояния между центром КТ и поверхностью скорость межзонного перехода спадает резко, чем экситонного, как показано на рис. 2.

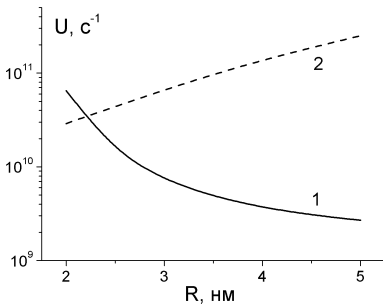


Рис. 1. Зависимость скорости перехода от радиуса КТ, расстояние до поверхности $d = 10$ нм

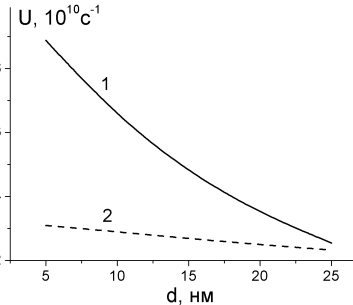


Рис. 2. Дистанционная зависимость скорости перехода, радиус КТ $R = 2$ нм

Список литературы

1. Федоров А.В., Рухленко И.Д., Баранов А.В., Кручинин С.Ю. Оптические свойства полупроводниковых квантовых точек. СПб: Наука. 2011.

Т.С. КОНДРАТЕНКО, А.И. ЗВЯГИН, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА,
М.С. СМІРНОВ, О.В. ОВЧИННИКОВ
Воронежский государственный университет

НЕЛИНЕЙНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И РЕФРАКЦИЯ В КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ Ag₂S

Для коллоидных квантовых точек сульфида серебра, стабилизированных в желатине и пассивированных тиогликолевой кислотой исследованы нелинейно-оптические свойства под действием 10 нс лазерных импульсов второй гармоники Nd³⁺:YAG-лазера (532 нм). Обнаружено обратное насыщение поглощения и рефракция падающего излучения, включая тепловую самодефокусировку. Установлена взаимосвязь нелинейно-оптических и люминесцентных свойств исследуемых коллоидных растворов.

T.S. KONDRATENKO, A.I. ZVYAGIN, A.S. PEREPELITSA,
M.S. SMIRNOV, O.V. OVCHINNIKOV
Voronezh State University

NONLINEAR ABSORPTION AND REFRACTION IN COLLOIDAL QUANTUM DOTS Ag₂S

For colloidal silver sulfide quantum dots stabilized in gelatin and passivated with thioglycolic acid, nonlinear optical properties under the action of 10 ns second-harmonic pulses of a Nd³⁺: YAG laser (532 nm) were investigated. Reverse saturation absorption and refraction of incident radiation, including thermal self-defocusing, have been found. The interrelation of nonlinear optical and luminescent properties of the studied colloidal solutions was established.

В последние годы активно исследуются нелинейно-оптические свойства коллоидных квантовых точек. Коллоидные квантовые точки (КТ) Ag₂S интересны, поскольку обладают достаточной степенью нестехиометрии и заметной концентрацией структурно-примесных дефектов, обусловленных дефицитом ионов серебра в решетке. Часть из таких дефектов в КТ Ag₂S играет роль центров рекомбинационной люминесценции, а другая часть – роль ловушек и центров безызлучательной рекомбинации. Их энергетические свойства могут обеспечить резонанс для двухфотонных переходов и нелинейного поглощения света. В данной работе установлены условия для обратного насыщенного поглощения и нелинейной рефракции в коллоидных

растворах КТ Ag_2S , пассивированных тиогликолевой кислотой (TGA) и Ag_2S , стабилизированных желатиной средними размерами 1.5-2.1 нм. Особое внимание уделено установлению взаимосвязи спектрально-люминесцентных и нелинейно-оптических свойств исследуемых образцов.

Исследования нелинейно-оптических свойств КТ Ag_2S выполняли методом Z-сканирования с помощью стандартной экспериментальной установки. Использовали вторую гармонику $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера (LS-2132UTF, LOTIS III) с $\lambda = 532$ нм, полученную на кристалле KDP. Импульсы имели длительность 10 нс и частоту повторения 1 Гц. Излучение лазера фокусировали линзой с фокусным расстоянием 30 см. Диаметр перетяжки пучка составлял 60 мкм. Энергию лазерного импульса измеряли калиброванным фотодиодом и регистрировали цифровым вольтметром. Исследуемые образцы перемещали вдоль оси Z через фокальную точку, используя линейный транслятор 8MT50-200BS1-MEn1 (Standa) с шагом 0.5 мм, управляемый компьютером. Выбор падающей мощности осуществляли с точки зрения предотвращения оптического пробоя исследуемых образцов. Интенсивности, использованные в экспериментах, не превышали 4×10^8 Вт·см⁻² (532 нм).

Рассмотрены нелинейно-оптические свойства образцов КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ с различными размерами, обладающими, как экситонной (620 нм), так и рекомбинационной (660, 880 и 1205 нм) люминесценцией. Показано, что для образцов, обладающих рекомбинационной люминесценцией при наличии условий для резонансных двухфотонных переходов, характерно обратное насыщенное поглощение и нелинейная рефракция тепловой природы. Для квантовых точек $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$, у которых экситонная люминесценция возникает в условиях использования TGA как в качестве источника серы при кристаллизации квантовых точек Ag_2S , так и в качестве пассиватора интерфейса, доминирует преимущественно слабое двухфотонное поглощение и нелинейная рефракция нетепловой природы. Закономерности кинетики люминесценции подтверждают это заключение. Установленные различия для времен жизни люминесценции различных образцов указывают на разное состояние интерфейсов коллоидных квантовых точек $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ с рекомбинационной и экситонной люминесценцией. Показано, что существенное значение имеет выполнение условий резонанса для двухфотонных переходов с участием реальных локализованных состояний.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 17-72-10225).

Н.В. ТЕПЛЯКОВ, А.С. БАЙМУРАТОВ, А.В. БАРАНОВ,
А.В. ФЁДОРОВ, И.Д. РУХЛЕНКО
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ХИРАЛЬНЫХ ФОРМ

В данном сообщении мы представляем общую теорию оптической активности квантовых точек хиральных форм. Используя преобразование координат, которое переводит хиральный нанокристалл в кубическую квантовую точку, мы показываем, что неровности на поверхности точки, имеющие размер порядка атома, могут приводить к оптической активности, которая превышает активность типичных хиральных молекул в 100 раз. Разработанный подход применим для нанокристаллов других форм, а полученные нами выражения могут применяться напрямую для моделирования и интерпретации спектров квантовых точек, а также для их использования в различных оптических и фотонных устройствах.

N.V. TEPLIAKOV, A.S. BAIMURATOV, A.V. BARANOV,
A.V. FEDOROV, I.D. RUKHLENKO
ITMO University, Saint-Petersburg

OPTICAL PROPERTIES OF QUANTUM DOTS WITH CHIRAL SHAPES

In this report we present a general theory of optical activity of semiconductor quantum dots with chiral shapes. Using a coordinate transformation that turns a chiral nanocrystal into a cubical quantum dot, we show that the atomic roughness of the nanocrystal surface can result in the optical activity, which exceeds that of typical chiral molecules by 100 times. The developed approach may prove useful for other nanocrystal shapes whereas the derived expressions apply directly for the modeling and interpretation of the spectra of quantum dots, as well as for their usage in various optic and photonic devices.

Вследствие несовершенства методик изготовления полупроводниковые квантовые точки, формы которых обычно аппроксимируют сферами, кубиками или пирамидами, на самом деле являются более или менее неправильными наночастицами из-за разного рода поверхностных и объемных дефектов [1]. Эти дефекты могут нарушать зеркальную симметрию точек, делая их хиральными и, соответственно, оптически активными [2]. С теоретической точки зрения важно уметь оценивать величину хирального оптического отклика,

связанного с неоднородностью поверхности квантовой точки, и уметь объяснять все особенности наблюдаемых спектров кругового дихроизма.

В данной работе был разработан универсальный метод, который позволяет решить данные задачи и аналитически рассчитать силу оптической активности полупроводниковой квантовой точки хиральной формы. При помощи преобразования координат, переводящего хиральный нанокристалл в квантовую точку кубической формы, были рассчитаны вращательные силы, коэффициенты диссимметрии и пиковые значения сигналов кругового дихроизма при внутризонных переходах внутри нанокристалла. Показано, что небольшие шероховатости поверхности квантовой точки могут приводить к оптической активности, в 100 раз превышающей активность типичных хиральных молекул. Разработанный метод может быть полезен при анализе других форм нанокристаллов, а полученные аналитические выражения можно непосредственно использовать для моделирования и интерпретации спектров кругового дихроизма ансамблей квантовых точек (рис. 1) и дальнейшего их использования в оптических и фотонных устройствах.

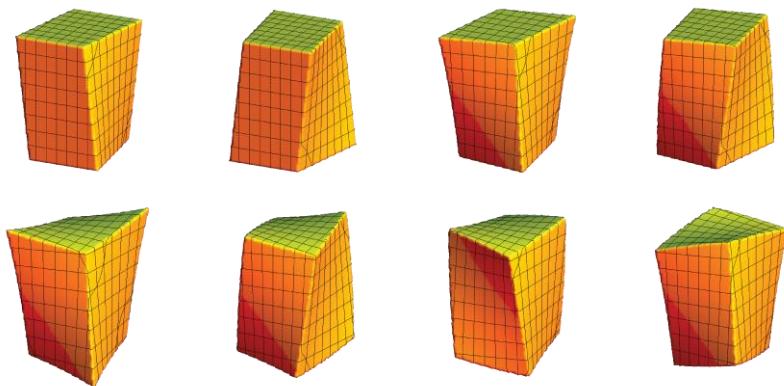


Рис. 1. Примеры хиральных квантовых точек, которые могут описываться разработанной теорией

Список литературы

1. Zhang J., Albelda M.T., Liu Y., Canary J.W. // Chirality. 2005. V. 17. P. 404-420.
2. Baimuratov A.S., Rukhlenko I.D., Noskov R.E., et. al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 14712.

Д.О. ВОЛОДИН¹, М.А. ЗВАЙГЗНЕ¹, А.Е. АЛЕКСАНДРОВ^{1,2},
П.С. САМОХВАЛОВ¹, И.Р. НАБИЕВ^{1,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

³Университет города Реймс, Франция

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СОСТАВА CdSe/ZnS/CdS/ZnS ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕТОДИОДАХ

Приведены результаты исследования влияния концентрации и температуры отжига на оптические свойства и качество поверхности тонких пленок квантовых точек состава CdSe/ZnS/CdS/ZnS. Рассмотрены перспективы применения изготовленных пленок в качестве электролюминесцентного слоя в светодиодах.

D.O. VOLODIN¹, M.A. ZVAIGZNE¹, A.E. ALEXANDROV^{1,2},
P.S. SAMOKHVALOV¹, I.R. NABIEV^{1,3}

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

²Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the RAS, Moscow

³University of Reims, Champagne-Ardenne, France

THIN CdSe/ZnS/CdS/ZnS QUANTUM DOTS FILMS FOR LED MANUFACTURING

The results of investigation of effects of the concentration and annealing temperature on the optical properties and surface quality of CdSe/ZnS/CdS/ZnS quantum dot thin films are presented. The perspectives of the use of manufactured films as an electroluminescent layer in LEDs are analyzed.

В последнее время ведутся активные работы по созданию и оптимизации гибридных светодиодов с электролюминесцентным слоем на основе пленок квантовых точек (КТ) – QDLED [1]. Основными параметрами изготовления пленок КТ, которые могут сильно влиять на характеристики конечного устройства [2], являются концентрация КТ в исходном растворе и условия отжига пленки после ее нанесения на подложку. В настоящей работе было исследовано влияние этих параметров на оптические свойства и качество поверхности пленок КТ нового типа, состава CdSe/ZnS/CdS/ZnS, на основе которых будут разработаны гибридные светодиоды QDLED следующего поколения.

Пленки КТ формировали методом нанесения раствора КТ в октане различной концентрации на вращающуюся стеклянную подложку с

последующим отжигом. Для всех образцов пленок КТ с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) были измерены толщины и шероховатость поверхности. Также были измерены спектры люминесценции и определен относительный квантовый выход (КВ) всех изготовленных пленок (рис. 1). Из полученных результатов можно сделать вывод о положительном влиянии отжига на люминесцентные свойства пленок КТ. Так, из данных приведенных на рис. 1 видно, что КВ увеличивается с повышением температуры отжига. При этом, наибольшим КВ, а также наименьшей шероховатостью обладали пленки КТ изготовленные из раствора с концентрацией КТ 5 мг/мл и температурой отжига 150 °С. Однако в спектрах люминесценции указанных образцов наблюдалось значительное уширение и сдвиг максимума в синюю область, что может косвенно свидетельствовать об окислении КТ внутри пленки, чего не наблюдалось в более толстых образцах, приготовленных с использованием концентраций в 20 и 40 мг/мл. Таким образом, учитывая важность чистоты цвета светодиода, можно предположить, что пленки, изготовленные из раствора КТ с концентрацией 20 мг/мл и последующим их отжигом при 150 °С являются наиболее подходящими для использования в светодиодах.

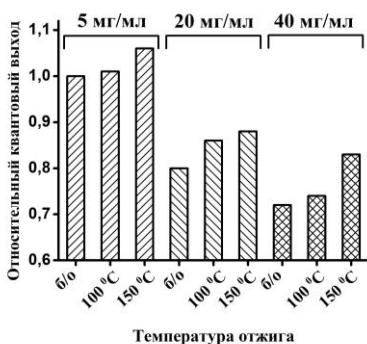


Рис. 1. Относительные квантовые выходы люминесценции образцов пленок квантовых точек, изготовленных без отжига (б/о) и с отжигом при 100 и 150 °С

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №. 18-19-00588).

Список литературы

1. Kang B.H., et. al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 34659.
2. Dayneko S., et. al. // Proc. of SPIE. 2014. V. 9270. P. 927009.

А.П. РУСИНОВ

Оренбургский государственный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe

С использованием техники Z-сканирования показано, что нелинейно-оптические свойства водных растворов квантовых точек CdSe при их активации в разных спектральных диапазонах описываются различными механизмами нелинейности.

A.P. RUSINOV

Orenburg State University

DEFINITION OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF WATER SOLUTIONS OF CdSe QUANTUM DOTS

Using the Z-scan technique, it is shown that the nonlinear optical properties of water solutions of CdSe quantum dots when activated in different spectral ranges are described by various nonlinearity mechanisms.

Для синтеза квантовых точек (КТ) CdSe использовались следующие прекурсоры: $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ – в качестве источника атомов кадмия, Na_2SeO_3 – в качестве источника атомов селена. Синтез проводился в водной среде, в качестве хелатирующего агента поверхности квантовых точек в раствор добавлялась тиогликолевая (меркаптоуксусная) кислота и pH раствора доводился до 9-10 добавлением NaOH. Для активации роста КТ раствор подвергался воздействию СВЧ излучения в течение 20-100 с [1, 2].

Изменением концентрации реагентов или времени их СВЧ-активации можно регулировать средние размеры синтезируемых квантовых точек и, следовательно, их оптические характеристики. Полученные растворы КТ отличаются высокой оптической и химической стабильностью, что крайне важно для использования последних в различных приложениях нанопластики, биоанализа и пр.

На рис. 1а представлены спектры поглощения для двух растворов КТ с различными средними размерами частиц, снятые на спектрофотометре Т70 с кварцевой кюветой. На графиках различимы несколько полос поглощения неодинаковой интенсивности, отвечающих переходам на различные уровни размерного квантования. Для КТ с большими средними размерами энергетические уровни сдвинуты в длинноволновую область.

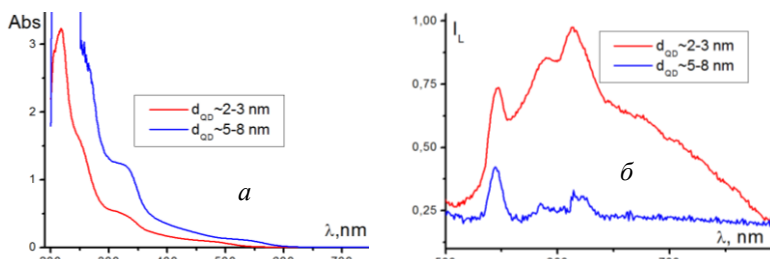


Рис. 1. Спектры поглощения (а) и люминесценции (б) водных растворов квантовых точек CdSe с различными средними размерами

Спектры люминесценции данных образцов (рис. 1б) характеризуются сравнительно невысоким квантовым выходом (порядка 5-10 %) и также обнаруживают зависимость спектра свечения от средних размеров частиц.

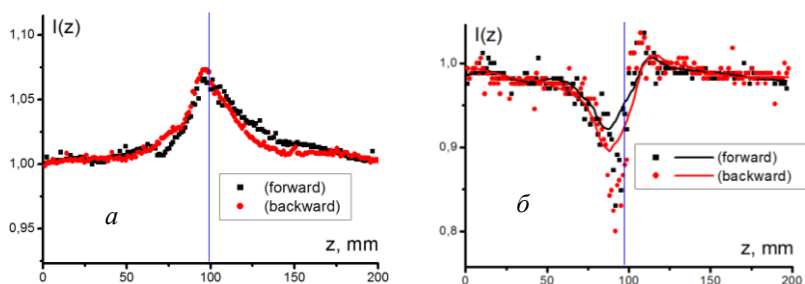


Рис. 2. Спектры Z-сканирования водных растворов квантовых точек CdSe со средними размерами 5-8 нм на длинах волн 532 нм (а) и 405 нм (б)

Нелинейные свойства водных растворов КТ CdSe исследовались методом Z-сканирования с использованием зондирующих пучков на длинах волн 532 и 405 нм. Показано, что в разных спектральных диапазонах основной механизм нелинейности растворов различен. Так при зондировании лазерным пучком с длиной волны 405 нм заметно проявляется самодефокусировка пучка из-за наведенной в образце тепловой линзы, а для длины волны 532 нм имеет место некогерентное насыщение поглощения (оптическое просветление) образца.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ. Проект № 3.7758. 2017/БЧ.

Список литературы

1. Xuan T., Wang X., Zhu G., et al. // Journ. of Alloys and Comp. 2013. V. 558. P. 105-108.
2. Wang J., Han H. // Journal of Colloid and Interface Science. 2010. V. 351. P. 83-87.

А.В. СКОБЁЛКИНА, Ф.В. КАШАЕВ, А.В. КОЛЧИН,
А.В. ХИЛОВ¹, Д.А. КУРАКИНА¹

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, В БИОФОТНИКЕ

Исследованы структурные и оптические свойства кремниевых наночастиц, сформированных последовательным использованием методов электрохимического травления (пористый кремний) и импульсной лазерной абляции. Показано, что такие наночастицы перспективны для фотoluminesцентной (флуоресцентной) визуализации биотканей и контрастирования методом оптической когерентной томографии.

A.V. SKOBELKINA, F.V. KASHAEV, A.V. KOLCHIN,
A.V. HILOV¹, D.A. KURAKINA¹

*Lomonosov Moscow State University
¹Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

APPLICATION OF SILICON NANOPARTICLES PRODUCED BY LASER ABLATION OF POROUS SILICON IN BIOPHOTONICS

Structural and optical properties of silicon nanoparticles, formed by sequential use of the electrochemical etching (porous silicon) and pulsed ablation, are studied. It is shown that such nanoparticles are promised in photoluminescent (fluorescent) bioimaging and contrasting by the optical coherence tomography technique.

Кремниевые наночастицы (КНЧ) представляют интерес для биомедицинских применений благодаря их низкому уровню токсичности и относительно быстрой биodeградации [1]. Так КНЧ можно использовать в качестве фотoluminesцентных (ФЛ) меток для визуализации живых организмов [1], лечения рака методами фотодинамической терапии [2] и гипертермии [3].

Целью настоящей работы является исследование структурных и оптических свойств КНЧ, изготавливаемых последовательно электрохимическим травлением, в результате которого формируются слои пористого кремния, и лазерной абляции полученных структур импульсами

пико- и фемтосекундного диапазонов в дистиллированной воде, этаноле и жидком азоте. Исследования показали, что в результате пикосекундной лазерной абляции формируется в значительной концентрации фракция наночастиц размером менее 20 нм (рис. 1а). Для данной фракции КНЧ, сформированных в этаноле и жидком азоте, наблюдается эффективная ФЛ с максимумом в интервале 700-800 нм, попадающим в диагностическое окно прозрачности биотканей.

Анализ данных спектрофотометрии образцов показал, что полученные наночастицы также могут быть использованы в качестве контрастирующих агентов для визуализации биологических тканей методом оптической когерентной томографии (ОКТ), что подтвердили дальнейшие эксперименты с фантомом биоткани на основе агарового геля, где был достигнут высокий контраст изображений (до 30 дБ).

В случае фемтосекундной лазерной абляции удастся сформировать КНЧ более крупного размера, чем при абляции пикосекундными импульсами (см., например, рис. 1б, где основная доля наночастиц находится в диапазоне 70-140 нм). Увеличение размеров на основании расчетов свидетельствует, что ансамбли таких КНЧ имеют более высокие коэффициенты светорассеяния по сравнению с частицами меньшего размера и, в свою очередь, представляют не меньший интерес для контрастирования биотканей и их фантомов методом ОКТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00884 мол_а).

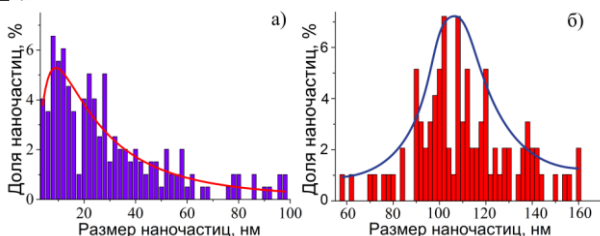


Рис. 1. Распределение по размерам КНЧ, полученных в результате абляции пористого кремния пикосекундными (а) и фемтосекундными (б) лазерными импульсами в этаноле

Список литературы

1. Park J.-H., Gu L., von Maltzahn G., et al. // Nature Materials. 2009. V. 8. P. 331-336.
2. Osminkina L.A., Gongalsky M.B., Motuzuk A.V., et al. // Appl. Phys. B. 2011. V. 105. P. 665-668.
3. Hong C., Lee J., Zheng H., et al. // Nanoscale Research Letters. 2011. V. 6. P. 321.

Н.Д. ЖУМАБАЙ, Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ НА ФОТОНИКУ РОДАМИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ

Была исследована дистанционная зависимость плазмонного эффекта островковых пленок серебра и золота на спектрально-люминесцентные свойства родаминового красителя в твердых пленках, приготовленных методом Ленгмюра-Блоджетт.

N.D. ZHUMABAY, E.V. SELIVERSTOVA, N.Kh. IBRAYEV
Buketov Karaganda State University, Kazakhstan

INFLUENCE OF PLASMON RESONANCE OF METAL NANOPARTICLES ON THE PHOTONICS OF RHODAMINE DYE IN NANOSIZED FILMS

The distance dependence of the plasmon effect of silver and gold island films on the spectral-luminescent properties of a rhodamine dye in solid films prepared by the Langmuir-Blodgett method was studied.

Наночастицы (НЧ) серебра и золота обладают уникальными оптическими свойствами, обусловленными поверхностным плазмонным резонансом, который имеет практическое применение в наноплазмонике и нанофотонике. Молекулы люминофоров, помещенные вблизи поверхности наночастиц металлов, также испытывают действие локальных электромагнитных полей. При этом в зависимости от расстояния между наночастицей и молекулой флуоресценция последних либо усиливается, либо гасится. В настоящей работе изучена дистанционная зависимость плазмонного эффекта наночастиц Ag и Au на спектрально-люминесцентные свойства родаминового красителя.

Образцы были приготовлены следующим образом: на стеклянные подложки напыляли островковые пленки серебра и золота методом термического вакуумного напыления. Пленки амфифильных производных родамина С – гептадецилового эфира родамина С (ГЭРС) с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) наносили поверх островковых пленок металлов. Толщина пленки была равна 5 монослоям красителя. Расстояние между островковыми пленками металлов и ЛБ пленкой ГЭРС

изменяли с помощью монослоя жирной кислоты (ЖК, стеариновая кислота), толщина которого составляет около 2,1 нм.

Таблица 1. Спектрально-люминесцентные параметры ЛБ пленок ГЭРС при различном расстоянии до ОПС

Образец	Количество слоев ЖК	$\lambda_{ч\text{ макс.}}$ нм	$\Delta\lambda_{1/2}^n$ нм	$\lambda_{ф\text{ макс.}}$	$\Delta\lambda_{1/2}^f$ нм	I, о.е	τ , нс
ГЭРС	Чистый	552	25	580	37	2,236	1,8
ОПС+ЖК +ГЭРС	0	552	25	580	36	2,542	1,6
	1	552	25	580	35	2,513	1,4
	3	552	25	580	35	2,937	1,0
	5	552	25	580	35	2,425	1,6
	7	552	25	580	35	2,24	1,9

Были измерены спектры поглощения и флуоресценции ГЭРС без и в присутствии НЧ металлов (табл. 1). При непосредственном контакте ГЭРС с НЧ серебра происходит увеличение интенсивности свечения красителя на 15 %. Максимальное увеличение интенсивности – почти на 25 %, было зарегистрировано при расстоянии от красителя до ОПС ~ 6 нм, что составляет 3 монослоя ЖК. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к уменьшению интенсивности свечения красителя почти до первоначального значения. Как показали спектрально-кинетические измерения, в присутствии серебра время жизни флуоресценции красителя также уменьшается и повторяет характер изменения интенсивности флуоресценции (см. табл. 1).

Для пленок золота было зарегистрировано только тушение как интенсивности, так и времени жизни флуоресценции обоих красителей. При этом, при непосредственном контакте с ОПЗ уменьшается в 5 раз. С увеличением расстояния между пленками до ~ 14 нм его значение восстановилось лишь наполовину.

Возрастание интенсивности флуоресценции красителя при малых расстояниях до НЧ серебра может быть связано с увеличением скорости электронных переходов в молекулах красителя, которые находятся в ближнем поле металлических НЧ с возбужденными плазмонами. При расстояниях до ОПС больше 6 нм, эффект плазмонного усиления уменьшается.

Д.А. СЫРНИКОВ, А.Д. КУРКОТОВ, В.И. КРЫЛОВ
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ОСАЖДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Исследована динамика осаждения наночастиц за счет светового давления в методе псевдо-призмы в нанодисперсной жидкофазной среде.

D.A. SYRNIKOV, A.D. KURKOTOV, V.I. KRYLOV
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

DEPOSITION OF NANOPARTICLES UNDER THE INFLUENCE OF A LIGHT PRESSURE

Dynamics of nanoparticle deposition at the influence of a light pressure in the pseudo-prism method in a nanodispersive fluid is investigated.

Широко известны химические методов формирования наноструктур (в том числе фотонных кристаллов) из жидкой фазы [1-3]. Однако недавние исследования демонстрируют ряд новых возможностей. Например, в работе [4] показано, как светоиндуцированная термодиффузии латексных микрочастиц в растворе приводит к образованию двумерного кристалла на охлаждающей поверхности в конвективном потоке жидкости. При этом концентрация микрочастиц увеличивалась в зоне светового пучка на несколько порядков. Для наночастиц реализация такого метода затруднена, поскольку коэффициент термодиффузии для них значительно меньше, чем для микрочастиц [5].

В данной работе предлагается использовать силы светового давления для формирования кристаллов из наночастиц в прозрачной наносuspензии.

Рассмотрим прозрачную наносuspензию с малой объемной долей дисперсной фазы, освещаемую потоком лазерного излучения с однородным распределением интенсивности. Установившаяся скорость наночастиц в suspension под действием светового поля в первом приближении линейно зависит от интенсивности излучения [3] - $V = \gamma I$, где

$$\gamma = \frac{64 \pi^2 a^5}{9 c_0} \frac{n_1}{\lambda^4 \eta} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} ,$$

где I – интенсивность света, $m = n_2/n_1$, (n_1, n_2 – показатели преломления веществ дисперсионной и дисперсной сред соответственно), η – вязкость жидкости, a – радиус частицы, λ – длина волны излучения, c_0 – скорость света.

Динамика изменения концентрации наночастиц описывается уравнением диффузии в световом поле. Решение одномерной задачи с соответствующими граничными условиями на верхней и нижней границах в стационарном решении выглядит как:

$$C(z', l) = C_0 I (\gamma l / D) \frac{\exp(z' \gamma l / D)}{\exp(\gamma l / D) - 1},$$

где $C(z, t)$ – массовая концентрация дисперсных частиц, D – коэффициент диффузии, C_0 – начальная концентрация наночастиц, l – высота кюветы, $z' = z/l$.

Как показывают оценки для увеличения относительной концентрации на несколько порядков требуются интенсивности около МВт/м², что однако для прозрачных наноматериалов вполне достижимо с использованием непрерывных лазерных источников. При этих мощностях объемная доля наночастиц на дне кюветы может достигать единицы, формируя условия для образования кристаллической структуры.

Предложенный метод формирования коллоидного кристалла из разбавленных наносuspensions представляет также интерес для формирования наносит, фотонных кристаллов и химических сенсоров, для увеличения чувствительности диффузионно-ограниченных поверхностных биодатчиков [2]. Результаты могут быть полезны также для развития методов оптической диагностики наноматериалов [6-9].

Список литературы

1. Texter J. // Comptes Rend. Chimie. 2003. V. 6. P. 1425-1433.
2. Zhang F.J., Cheng G.X., Ying X.G. // Reactive Func. Polym. 2006. V. 66. P. 712-719.
3. Иванова Г.Д. и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8(2). С. 141-143.
4. Dühr S., Braun D. // Applied Physics Letters. 2005. V. 86. P. 131921.
5. Крылов В.И. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2015. № 7. С. 329-332.
6. Khe V.K., et. al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 104664K.
7. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008.
8. Buzzaccaro S., et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. V. 20. P. 494219.
9. Иванов В.И., Мяготин А.В., Иванова Г.Д. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2017. № 9. С. 205-209.

Н.Х. ИБРАЕВ, А.К. АЙМУХАНОВ

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

**ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ Ag НА СВОЙСТВА
ВЫНУЖДЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 5973
В ЭТИЛОВОМ СПИРТЕ**

В работе представлены результаты исследования влияния наночастиц Ag на генерационные характеристики 5973 в этиловом спирте. Установлено, что присутствие наночастиц Ag в растворе уменьшает порог вынужденного излучения в 1,25 раз, а полуширину спектра на 1,1 раза.

N.Kh. IBRAYEV, A.K. AIMUKHANOV

Buketov Karaganda State University, Kazakhstan

**EFFECT OF Ag NANOPARTICLES ON THE PROPERTIES
OF STIMULATED EMISSION OF 5973 IN ALCOHOL**

In the work presents the results of a study of the effect of Ag nanoparticles on the generation characteristics of 5973 in ethanol. It has been established that the presence of Ag nanoparticles in a solution reduces the stimulated emission threshold by 1.25 times, and the half-width of the spectrum by 1.1 times.

Наночастицы (НЧ) Ag в этиловом спирте были получены лазерной абляцией. Концентрация наночастиц определялась по изменению массы мишени до и после абляции. Спектр поглощения НЧ Ag в спирте хорошо перекрывается со спектром поглощения 5973, что свидетельствует о выполнении условий резонанса между спектрами НЧ Ag и красителя. Квантовый выход флуоресценции 5973 в спирте составил 0,73.

Установлено, что присутствие концентрации НЧ серебра в растворе практически не оказывает влияния на поглощение красителя. Интенсивность флуоресценции красителя зависит от концентрации НЧ Ag. Интенсивность свечения красителя растет в 1,3 раза вплоть до концентрации НЧ $C_{Ag} = 6 \cdot 10^{-13}$ моль/л, а дальнейшее увеличение C_{Ag} приводит к тушению флуоресценции. Затухание флуоресценции 5973 при добавлении НЧ Ag не меняется.

При плотности мощности источника накачки ниже 3 МВт/см^2 наблюдается лишь спектр лазерно-индуцированной флуоресценции красителя 5973. При достижения мощности источника накачки значения 3 МВт/см^2 на фоне спектра лазерно-индуцированной флуоресценции

появляется узкая полоса с максимумом на длине волны 763 нм, которая относится к полосе генерации лазерного излучения. Дальнейшее увеличение плотности мощности источника накачки приводит к сужению спектра флуоресценции и развитию полосы генерации.

Из измеренных спектров излучения были построены зависимости полуширины спектра генерации и интенсивности вынужденного излучения пленки от плотности мощности накачки (рис. 1) и определены пороговые значения накачки красителя в спирте.

Сужение полосы излучения с ростом интенсивности возбуждения свидетельствует о преобладании вынужденного излучения над спонтанным, т.е. о переходе системы в режим генерации. Значение порога генерации определяли по резкому изменению скорости роста интенсивности излучения красителя в растворе. Порог генерации при накачке лазером $\lambda_{ген} = 532$ нм составляет в среднем $2,5 \text{ МВт/см}^2$ (см. рис. 1).

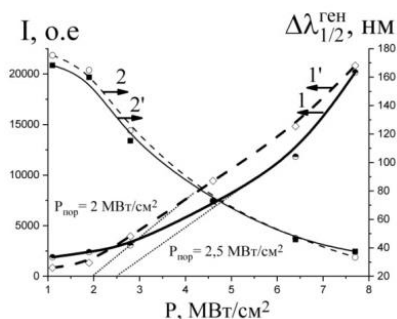


Рис. 1. Зависимость полуширины линии генерации и интенсивности свечения 5973 в спирте от плотности мощности накачки: 1, 2 – без НЧ; 1', 2' – с НЧ Ag

Влияние плотности мощности накачки на интенсивность и полуширину спектра вынужденного излучения 5973 в этиловом спирте с НЧ 5973 показано также на рис. 1. Сравнение экспериментальных данных для образцов с НЧ 5973 и без них показывает корреляцию между изменениями интенсивности излучения и полушириной спектра излучения. Из полученных данных видно уменьшение порога генерации в присутствии в растворе НЧ Ag. Для раствора красителя с НЧ 5973 порог генерации снижается на 1,25 раз, а полуширина спектра сократилась на 1,1 раза.

З.А. ЗАБАЛУЕВА, Э.К. НЕПОМНЯЩАЯ, Е.Н. ВЕЛИЧКО

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПАРАМЕТРЫ СХЕМЫ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ

В данной работе представлена схема и подобраны оптимальные параметры кросскорреляционной установки, позволившие получить кросскорреляционную функцию, аппроксимируемую гладкой экспоненциальной кривой и вычислить размеры наночастиц в растворах с многократным рассеянием света.

Z.A. ZABALUEVA, E.K. NEPOMNYASHCHAYA, E.N. VELICHKO

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

PARAMETERS OF THE CROSS-CORRELATION SCATTERING SCHEME FOR ESTIMATING THE NANOPARTICLE SIZES

In this paper the scheme is presented and the optimal parameters of the cross-correlation installation which allowed us to obtain a cross-correlation function approximated by a smooth exponential curve and calculate the sizes of nanoparticles in solutions with multiple light scattering are selected.

Метод кросс-корреляции используется для оценки размеров наночастиц в коллоидных растворах или суспензиях [1]. Он позволяет быстро исследовать как сильно разбавленные, так и мутные образцы.

В методе кросс-корреляции кювета с образцом освещается двумя лазерными пучками, и интенсивность рассеянного света регистрируется двумя фотоприемниками. Вычисляется взаимная корреляционная функция сигналов флуктуаций интенсивности рассеянного света. Информацию о параметрах рассеивателей несет в себе только однократно рассеянный свет. В методе кросс-корреляции вклады от многократного рассеяния подавляются за счет геометрии рассеяния [2]. Поэтому, проанализировав взаимную корреляционную функцию, можно оценить гидродинамические радиусы частиц в жидком образце.

Целью данной работы является подбор оптимальных параметров экспериментальной установки с последующим проведением опытов на суспензиях латексных микросфер с известными размерами.

На рис. 1 представлена схема разработанной экспериментальной установки для проведения экспериментов по кросс-корреляционному

рассеянию. В ней два равных лазерных пучка фокусируются на рассеивающем объеме в кювете. Оптические волокна расположены так, что спекл-поле, созданное однократно рассеянным светом, будет попадать на входную апертуру обоих оптоволокон и коррелировать, а спеклы многократно рассеянного света, размеры которых меньше, не будут создавать вклада во взаимную корреляционную функцию [2].

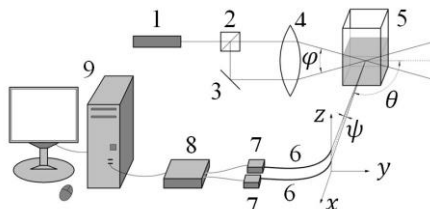


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по кросс-корреляционному рассеянию:

- 1 - полупроводниковый лазер $\lambda = 650$ нм, 2 - светоделитель, 3 - зеркало,
4 - собирающая линза, 5 - кювета с образцом, 6 - оптическое волокно,
7 - фотоэлектронный умножитель, 8 - аналого-цифровая плата, 9 - компьютер

Экспериментальная взаимная корреляционная функция аппроксимируется гладкой экспоненциальной кривой $g_2(\tau)$. Оценка размеров частиц r производится в соответствии с формулой [3]

$$\ln(g_2(\tau)-1) \sim D(r),$$

где D – коэффициент поступательной диффузии частиц, связанный с радиусом соотношением Стокса-Эйнштейна [4].

Для разработанной установки были подобраны оптимальные значения углов: $\varphi = 34^\circ$, $\psi = 6^\circ$ и $\theta = 90^\circ$, расстояния между сердцевинами оптических волокон: 0,4 мм и расстояния от центра кюветы до входной апертуры оптоволокон: 20 см. Подобранные параметры позволили получить наиболее гладкую кросскорреляционную функцию и рассчитать размеры наночастиц в модельном растворе латексных микросфер с диаметром 320 нм. Измеренное экспериментально значение составило 319 нм. В дальнейшем планируется распространить метод кросс-корреляции на полидисперсные образцы.

Список литературы

1. Urban C., Schurtenberger P. // J. of colloid and interface science. 1998. V. 207. P. 150-158.
2. Meyer W.V., Cannell D.S., Smart A.E., Taylor T.W., Tin P. // App. Opt. 1997. V. 36 (30). P. 7551-7558.
3. Witt W., Geers H., Aberle L. // PARTEC. 2004.
4. Nepomnyashchaya E., Savchenko E., Velichko E., Aksenov E. // J. of Biomed. Physics and Eng. 2017. P. 2040309.

А.В. КОЛЧИН, Ф.В. КАШАЕВ, А.В. СКОБЁЛКИНА,
Д.В. ШУЛЕЙКО, Т.П. КАМИНСКАЯ, А.В. ПАВЛИКОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ,
СФОРМИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
АБЛЯЦИЕЙ КАРБИДА КРЕМНИЯ В ЖИДКОСТЯХ**

Методами атомно-силовой микроскопии и спектроскопии КРС были исследованы структурные свойства наночастиц, полученных с помощью импульсной лазерной абляции поликристаллического и пористого карбида кремния в различных жидкостях.

A. V. KOLCHIN, F. V. KASHAEV, A. V. SKOBELKINA,
D. V. SHULEIKO, T. P. KAMINSKAYA, A. V. PAVLIKOV
Lomonosov Moscow State University

**STRUCTURAL PROPERTIES OF NANOPARTICLES
FORMED VIA PULSED LASER ABLATION
OF SILICON CARBIDE IN LIQUIDS**

By atomic-force microscopy and Raman spectroscopy structural properties of nanoparticles formed via pulsed laser ablation in different liquids were studied.

Наноструктурирование полупроводников, в том числе с помощью метода импульсной лазерной абляции в жидких средах, позволяет модифицировать их физические свойства, расширяя тем самым области возможного применения [1]. В настоящее время интересным материалом для подобных исследований является карбид кремния (SiC) ввиду высокой теплопроводности, химической стабильности, низкого коэффициента теплового расширения и высокой подвижности электронов [2].

В данной работе подложки поликристаллического и пористого карбида кремния кубической модификации 3C-SiC подвергались абляции с помощью импульсного Nd:YAG-лазера (532 нм, 20 мДж, 35 пс, 10 Гц) в воде и этаноле. Структурные свойства исходных мишеней и сформированных наночастиц были исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) при длине волны возбуждения 632 нм.

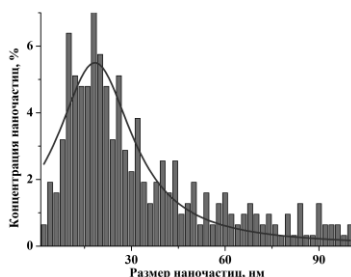


Рис. 1. Гистограмма распределения наночастиц по размерам

Как видно на гистограмме из рис. 1, построенной на основе данных АСМ, в результате лазерной абляции поликристаллического SiC в воде удалось сформировать фракцию наночастиц с размерами от 2 до 100 нм.

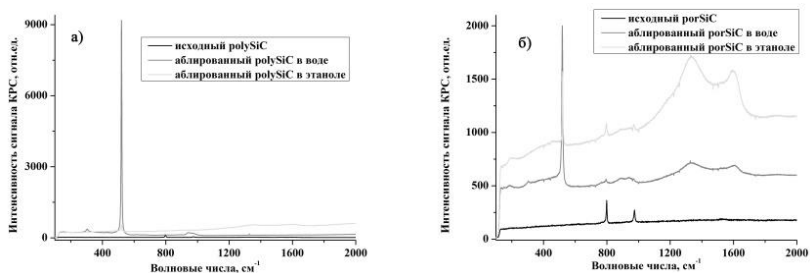


Рис. 2. Спектры КРС исходных и аблированных образцов

В спектрах КРС наночастиц, полученных путем лазерной абляции пористого 3С-SiC и в воде, и в этаноле, присутствуют линии, соответствующие не только исходному материалу (791 и 980 см^{-1}), но и аморфному (480 - 510 см^{-1}) и кристаллическому (520 см^{-1}) кремнию, а также D- (1350 см^{-1}) и G-линии (1582 см^{-1}) углерода. Это может свидетельствовать о возможном образовании многостенных углеродных нанотрубок [3]. В то время как для абляции поликристаллического 3С-SiC подобная тенденция замечена лишь в случае использования этанола в качестве буферной среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-00884 мол_а.

Список литературы

1. Zhu J., Hu S., et al. // Appl. Phys. A. 2017. V. 12 (4). P. 244.
2. Sherban N.D. // J. Ind. Eng. Chem. 2017. V. 50. P. 16.
3. Kruszynska M., Kalenczuk R.J. // Mater. Sci. Poland. 2008. V. 26(2). P. 434.

С.В. САПАРИНА, С.С. ХАРИНЦЕВ

Казанский федеральный университет

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ УГЛЕРОДНОГО НАНОПОКРЫТИЯ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПОМОЩЬЮ НОВОГО
КЛАССА ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ
ЛОКАЛЬНО-УСИЛЕННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

В работе проведена химическая диагностика наноразмерных (15-30 нм) углеродных аллотропов в защитном покрытии оптических волокон с использованием нового гибридного подхода, основанного на комбинировании локально-усиленного антистоксовского гигантского комбинационного рассеяния света и электроиндуцированного нагрева углеродного покрытия.

S.V. SAPARINA, S.S. KHARINCEV

Kazan Federal University

**CHARACTERIZATION OF CARBON NANOLAYER
OF OPTICAL FIBERS VIA A NEW CLASS OF HYBRID
TIP-ENHANCED RAMAN SCATTERING METHODS**

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

Оптические волокна, используемые для регистрации данных в нефтяных скважинах, могут подвергаться значительным механическим стрессам при повышенных температурах и давлениях. Для защиты оптического волокна от агрессивной окружающей среды оно часто покрывается тонким слоем аморфного углерода [1, 2]. Несмотря на существенные успехи, достигнутые в области технологии нанесения покрытий, до настоящего времени нет полного понимания причин возникновения дефектов в углеродном слое [3], способствующих проникновению водорода и влаги к поверхности волокна. В работе для

химической диагностики наноразмерных (15-30 нм) углеродных аллотропов в защитном покрытии оптических волокон был использован новый гибридный подход, основанный на комбинировании локально-усиленного антистоксовского гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света и электроиндуцированного нагрева углеродного покрытия. Этот метод позволил нам селективно проанализировать структурный состав углеродных покрытий оптических волокон, визуализировать различные формы углерода (сажа, стеклоуглерод, аморфный углерод, нанотрубки, фуллерены и др.), а также определить ориентацию углеродных аллотропов и их симметрию. В частности, было установлено, что углеродные покрытия содержат углеродные нанотрубки, которые могут выполнять роль транспортных каналов для молекулярного водорода и влаги, из-за которых прозрачность волокна может существенно ухудшаться.

Развитие гибридных методов ГКР с пространственным разрешением < 10 нм на воздухе представляет важную задачу в области химической диагностики наноразмерных углеродных аллотропов.

Список литературы

1. Bolognini G, Hartog A. // Opt. Fiber Technol. 2013. V. 19. P. 678-688.
2. Siska P, Latal J., et. al. // Opt. Quant. Electron. 2016. V. 48. P. 1-21.
3. Sadezky A., Muckenhuber H., et. al. // Carbon. 2005. V. 43.P. 1731-1742.

А.С. УСТИНОВ¹, Л.А. ОСМИНКИНА¹, А.И. ЕФИМОВА¹,
С.В. ЗАБОТНОВ^{1,2,3}, Л.А. ГОЛОВАНЬ¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

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

АНИЗОТРОПИЯ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ В МАССИВАХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ

В работе была продемонстрирована существенная зависимость эффективности генерации третьей гармоники (ТГ) от направления падения излучения накачки в упорядоченных массивах кремниевых нанонитей (КНН) диаметром порядка 100 нм, сформированных методом металл-стимулированного химического травления кристаллического кремния с ориентацией поверхности (110). В случае падения излучения накачки перпендикулярно КНН сигнал ТГ оказывается в несколько раз выше, чем при падении излучения накачки вдоль КНН, при этом наблюдается полное изменение ориентационных зависимостей. Обнаружено различие в сигналах ТГ для излучения накачки с правой и левой циркулярными поляризациями.

A.S. USTINOV¹, L.A. OSMINKINA¹, A.I. EFIMOVA¹,
S.V. ZABOTNOV^{1,2,3}, L.A. GOLOVAN¹

¹Lomonosov Moscow State University

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny

ANISOTROPY OF THE THIRD HARMONIC GENERATED IN SILICON NANOWIRE ENSEMBLES

The third-harmonic (TH) generation efficiency in ordered arrays of silicon nanowires (SiNWs) of about 100 nm in diameter formed by means of metal-stimulated chemical etching was found to be significantly dependent on the fundamental radiation incidence. Its orientational dependencies are significantly conditional on the direction of incidence of the pump radiation, along the SiNWs or perpendicular to them. In the case of incidence perpendicular to the SiNWs the TH signal is several times higher than the TH signals for the fundamental radiation incident along the SiNWs, thus a complete change in the TH orientational dependencies is observed. The difference of the TH signal for left and right circular polarizations of the fundamental radiation was demonstrated.

Массивы кремниевых нанонитей (КНН) диаметром порядка 100 нм и длиной 0,1...100 мкм представляют большой интерес ввиду своих

необычных оптических свойств и перспективности их применения в различных устройствах. Такие массивы могут быть получены, например, с использованием метода металл-стимулированного химического травления (МСХТ) [1]. Среди оптических свойств массивов КНН следует отметить их чрезвычайно низкое отражение и практически полное поглощение излучения видимого диапазона, большую величину отражения в ближнем инфракрасном диапазоне и рост эффективности процессов комбинационного рассеяния света и межзонной фотолюминесценции [2]. Эти эффекты объясняются увеличением времени жизни фотонов в массивах КНН, обусловленном сильным рассеянием света в них [3]. С другой стороны, размер КНН, сравнимый с длиной волны в кремнии, позволяет рассматривать их массивы как диэлектрический метаматериал [4]. В связи с этим встает задача определения взаимосвязи структурных характеристик массивов КНН и их оптических свойств. Для изучения этой взаимосвязи стоит использовать метод генерации третьей гармоники (ТГ), который весьма чувствителен к величинам локального поля.

В настоящей работе были использованы ансамбли КНН, сформированные методом МСХТ на поверхности кристаллического кремния с ориентацией поверхности (110), КНН при этом оказываются наклонены под углом 45° к поверхности кристалла. Проводились измерения ориентационных зависимостей сигнала ТГ при накачке излучением фемтосекундного лазера на кристалле Si:форстерита (1250 нм, 80 фс, 150 мВт, 80 МГц).

Как оказалось, эффективность генерации ТГ и ее ориентационные зависимости существенно обусловлены направлением падения излучения накачки. Так, сигнал ТГ при падении излучения накачки перпендикулярно КНН оказывается в несколько раз выше, чем сигнал ТГ при падении излучения накачки вдоль КНН, при этом наблюдается полное изменение ориентационных зависимостей. Обнаружено различие сигналов ТГ при ее накачке левой и правой циркулярными поляризациями, свидетельствующее о псевдохиральности массивов КНН.

Список литературы

1. Sivakov V.A., et al. Realization of vertical and zigzag single crystalline silicon nanowire architectures // J. Phys. Chem. C. 2010. V. 114 (9). P. 3798–3803.
2. Osminkina L.A., et al. Optical properties of silicon nanowire arrays formed by metal-assisted chemical etching: evidences for light localization effect // Nanoscale Research Lett. 2012. V. 7 (1). P. 524.
3. Efimova A.I., et al. Enhanced photon lifetime in silicon nanowire arrays and increased efficiency of optical processes in them // Optical and Quantum Electronics. 2016. V. 48. P. 232–240.
4. Jahani S., et al. All-dielectric metamaterials // Nature Nanotechnology. 2016. V. 11 (1). P. 23–36.

М.А. МОШКОВА^{1,2}, А.В. ДИВОЧИЙ², П.В. МОРОЗОВ²,
А.В. АНТИПОВ², Ю.Б. ВАХТОМИН^{2,3}, К.В. СМИРНОВ^{1,2,3}

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

²*ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва*

³*Московский педагогический государственный университет*

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С РАЗРЕШЕНИЕМ ЧИСЛА ФОТОНОВ РАЗЛИЧНЫХ ТОПОЛОГИЙ

Проведен сравнительный анализ топологий сверхпроводниковых однофотонных детекторов с способностью к разрешению до 4 фотонов в коротком импульсе ИК-излучения. Получен детектор с системной эффективностью детектирования ~ 85 % на $\lambda = 1550$ нм. Продемонстрирована возможность его использования для восстановления статистики фотонов импульсного источника излучения.

M.A. MOSHKOVA^{1,2}, A.V. DIVOCHIY², P.V. MOROZOV²,
A.V. ANTIPOV², Yu.B. VAKHTOMIN^{2,3}, K.V. SMIRNOV^{1,2,3}

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

²*LLC “Superconducting Nanotechnology”, Moscow*

³*Moscow State Pedagogical University*

CHARACTERIZATION OF TOPOLOGIES OF SUPERCONDUCTING PHOTON NUMBER RESOLVING DETECTORS

Comparative analysis for different topologies of superconducting single-photon detectors with ability to resolve up to 4 photons in a short pulse of IR radiation has been carry out. It was developed the detector with a system detection efficiency of ~ 85 % at $\lambda = 1550$ nm. The possibility of using such detector to restore photon statistics of a pulsed radiation source was demonstrated.

Высокая востребованность сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD) [1] способствовала созданию SSPD с рекордными значениями системной эффективности детектирования (SDE), временного разрешения и низким уровнем темнового счета [2, 3]. Обнаружение способности SSPD к разрешению числа фотонов (PNR – photon number resolution) в импульсе излучения [4], также вызывает большой интерес

[5, 6] и способствует дальнейшему развитию таких детекторов. Целью работы являлось исследование двух топологий PNR SSPD и создание PNR детекторов с высоким значением SDE.

Исследованный нами PNR SSPD состоит из четырёх секций – NbN полосок свернутых в меандр, которые могут быть распределены на подложке различно: расположены рядом с неперекрывающимися чувствительными областями (топология № 1, рис. 1а) или равномерно распределены на всей площади детектора $15 \times 15 \text{ мкм}^2$ (топология № 2, рис. 1б).

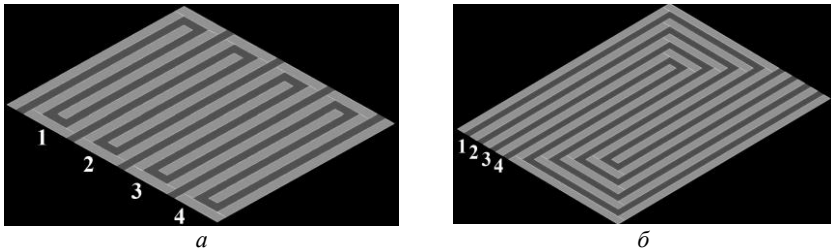


Рис. 1. Топологии PNR SSPD: топология № 1 (а), топология № 2 (б)

Измеренные значения n-фотонных отсчетов для образца с топологией № 2 практически полностью совпадают с расчетными, и имеют заметные отклонения для образца с топологией № 1, что объясняется нами пространственной неоднородностью выходной мощности лазерного излучения в сечении одномодового волокна. Определенная SDE для образца с топологией № 2 составила 85 %, что позволяет использовать данный детектор для восстановления статистики источника излучения.

Список литературы

1. Gol'tsman G., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 705.
2. Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Yu., et. al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 052601.
3. Smirnov K., et. al. // Superconductor Science and Technology. 2018. V. 31(3). P. 035011.
4. Divochiy A., et. al. // Nature Photonics. 2008. V. 2(5). P. 302.
5. Yamashita T., et. al. // IEICE Transactions on Electronics. 2017. V. 100 (3). P. 274-282.
6. Cattaneo M., et. al. // Phys. Rev. A. 2018. V. 98 (1). P. 012333.

П.П. НЕЯСОВ, И.Р. АЛИМБЕКОВ, М.Г. КУЧЕРЕНКО

Оренбургский государственный университет

**ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ
КРОСС-АННИГИЛЯЦИОННОЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ
ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛ В НАНОРЕАКТОРАХ
С ЧАСТИЦАМИ МАГНЕТИТА**

Представлены экспериментальные результаты исследования сигналов замедленной флуоресценции системы эозин-антрацен в нанопористом силохроме С-80, содержащем частицы магнетита. Обнаружено влияние наночастиц магнетита на величину сигнала кросс-аннигиляционной флуоресценции.

P.P. NEYASOV, I.R. ALIMBEKOV, M.G. KUCHERENKO

Orenburg State University

**FORMATION OF PULSES OF CROSS-ANNIHILATION
DELAYED FLUORESCENCE OF MOLECULES
IN NANOREACTORS WITH MAGNETITE PARTICLES**

The experimental results of the study of signals of delayed fluorescence of the eosin-anthracene system in the C-80 nanoporous silochrome containing magnetite particles are presented. The effect of magnetite nanoparticles on the magnitude of the cross-annihilation fluorescence signal has been found.

Ферромагнитные наночастицы [1] могут служить в качестве магнитоуправляющих элементов при формировании импульсов кросс-аннигиляционной замедленной флуоресценции (ЗФ) в спин-селективных реакциях в нанопористых системах. Теоретическая модель, описывающая процесс триплет-триплетной аннигиляции в таких системах, представлена в работе [2].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния магнитных наночастиц магнетита на величину сигнала ЗФ системы эозин-антрацен в порах силохрома С-80. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Возбуждение системы производилось на длине волны 532 нм, регистрация – на 560 нм.

Обнаружен эффект влияния наночастиц на амплитудные значения сигналов замедленной флуоресценции системы во внешнем магнитном поле (рис. 2). Обнаружено уменьшение флуоресцентного отклика на действие магнитного поля в два раза, при добавлении частиц магнетита

(см. рис. 2б). Данный факт может быть объяснен появлением собственного эффективного магнитного поля наночастиц. Нормировка амплитудных значений проводилась относительно значений в нулевом магнитном поле. Полученные результаты позволяют производить оценку величины эффективного магнитного поля наночастиц по сигналу ЗФ.

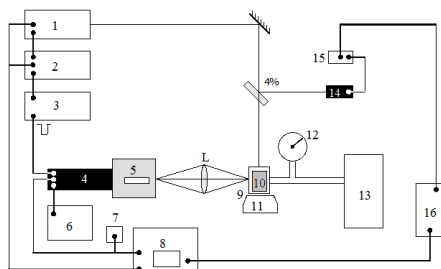
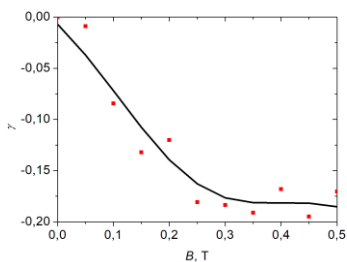
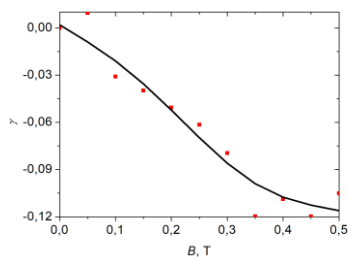


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер LQ529, 2 - синхронизирующий генератор, 3 - запирающий генератор, 4 - ФЭУ-84, 5 - монохроматор МХД-2, 6 - блок питания, 7 - магазин шунтирующих сопротивлений, 8 - осциллограф, 9 - кювета вакуумируемая, 10 - образец, 11 - электромагнит, 12 - датчик давления, 13 - вакуумный насос, 14 - фотодиод, 15 - прибор для контроля интенсивности лазерного импульса, 16 - компьютер, L - фокусирующая линза



а



б

Рис. 2. Зависимость амплитудного значения сигнала ЗФ системы от индукции внешнего магнитного поля (а); та же зависимость, но с добавлением наночастиц (б)

Список литературы

1. Park J., et. al. // *Angew. Chem.* 2005. V. 117. P. 2932–2937.
2. Кучеренко М.Г., Неясов П.П. // *Химич. физика и мезоскопия.* 2018. Т. 20. № 1. С. 33-48.

О.Б. КУЗНЕЦОВА, Е.А. САВЧЕНКО, Е.Н. ВЕЛИЧКО
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ МЕТОДОМ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ МИКРОСКОПИИ В РЕЖИМЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

В работе представлен способ регистрации флуоресцентных изображений одиночных молекул с помощью метода флуоресцентной микроскопии в режиме полного внутреннего отражения, который позволяет определять местоположение молекулы с субдифракционной точностью и отличается высоким соотношением сигнал/шум регистрируемого сигнала. Проведен компьютерный анализ полученных изображений на примере красителя R6G. Обсуждаются экспериментальные данные и возможные области применения полученных результатов.

O.B. KUZNETSOVA, E.A. SAVCHENKO, E.N. VELICHKO
Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

VISUALIZATION OF SINGLE MOLECULES BY THE METHOD OF TOTAL INTERNAL REFLECTION FLUORESCENT MICROSCOPY

The paper presents a method for registering fluorescent images of single molecules using the fluorescence microscopy method in the total internal reflection mode, which allows determining the location of a molecule with sub-diffraction accuracy and is characterized by a high signal-to-noise ratio of detected signal. A computer analysis of the images obtained using the R6G dye was carried out. Experimental data and possible applications of the obtained results are discussed.

Существует несколько методов обнаружения одиночных молекул. В настоящее время исследователи, в основном, интересуются методом флуоресцентной микроскопии, так как в сравнении с другими методами исследования он обладает высокой чувствительностью наряду с высокой контрастностью изображений и менее фототоксичен для исследуемых тканей [1, 2]. Использование наборов флуорофоров позволило исследователям идентифицировать микроскопические клеточные компоненты и специфические клетки среди веществ, которые не являются флуоресцентными. Одним из наиболее распространенных типов флуоресцентной микроскопии является флуоресцентная микроскопия

полного внутреннего отражения (ФМПВО). Метод, который мы рассматриваем, позволяет визуализировать одиночные молекулы. ФМПВО широко используется в биомедицине: исследование экспрессии генов, исследование динамики взаимодействия белков с клеточной мембраной [3]. Используя флуоресцентные молекулы в качестве зондов в исследуемые образцы, возможно будет получить информацию о локальной нанометровой среде молекул. При дальнейшем анализе данная информация позволит изучить структуру и динамику одиночных молекул на микроскопическом уровне.

Целью данной работы является визуализация одиночных молекул с помощью оптической установки на основе метода флуоресцентной микроскопии в режиме полного внутреннего отражения и анализа полученных изображений для определения положения (координат) исследуемого объекта.

Используемая оптическая установка состоит из источника возбуждения флуоресценции, в качестве которого используется полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм, призмы полного внутреннего отражения, на которую помещается исследуемый объект, набора фильтров (возбуждения и эмиссии) и камеры с низким уровнем шумов (62 дБ), высокой эффективностью (95 %), высокими спектральным (380-650 нм) и динамическим (50 дБ) диапазонами. Детальное описание установки приведено в работе [1]. В качестве объекта исследования был выбран краситель R6G. Анализ полученных изображений для определения положения (координат) исследуемого объекта проводится в программе ImageJ.

Первые экспериментальные результаты по визуализации флуоресценции позволяют сделать вывод о перспективности применения данного способа для регистрации слабых излучений от одиночных молекулярных структур с целью определения их местоположения, однако требуются дальнейшее усовершенствование компьютерного анализа для улучшения точности восстановления координат одиночных молекул.

Список литературы

1. Кузнецова О.Б., Савченко Е.А., Аксёнов Е.Т. Детектирование одиночных наночастиц методом флуоресцентной микроскопии в режиме полного внутреннего отражения // Неделя Науки СПбПУ. 2017. С. 128-130.

2. Савченко Е.А., Непомнящая Э.К., Дюбо Д.Б., Величко Е.Н., Цыбин О.Ю. Новая схема регистрации флуоресценции в биомолекулярных жидкостях // VI международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборн. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 456-457.

3. Elowitz M.B., Levine A.J., Siggia E.D., Swain P.S. Stochastic gene expression in a single cell // Science. 2002. V. 297(5584). P. 1183-1186.

В.С. ГЕРАСИМОВ^{1,2}, А.Е. ЕРШОВ^{1,2}, Р.Г. БИКБАЕВ²,
И.Л. РАССКАЗОВ³

¹*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

³*Рочестерский университет, США*

ПРОЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ РЕЛЕЯ В ГИБРИДНЫХ ПЛАЗМОННО-ФОТОННЫХ СТРУКТУРАХ

В работе представлена модель описывающая взаимодействие мод одномерных фотонных кристаллов с двумерной решеткой плазмонных наночастиц, внедренной в его дефектный слой, для разработки оптических сенсоров, модуляторов и лимитеров, используемых в сложных спутниковых системах.

V.S. GERASIMOV^{1,2}, A.E. ERSHOV^{1,2}, R.G. BIKBAEV²,
I.L. RASSKAZOV³

¹*Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

³*University of Rochester, USA*

THE MANIFESTATION OF RAYLEIGH ANOMALIES IN HYBRID PLASMON-PHOTONIC STRUCTURES

We introduce analytical model, which describe the interaction between 1D photonic crystal and 2D array of plasmonic nanoparticles embedded in its defect layer for optimal design of sensors, light limiters, modulators for use in complex satellite systems.

В настоящей работе исследуется гибридная наноструктура, состоящая из одномерного фотонного кристалла (ФК) с дефектным слоем и двумерной периодической решетки золотых нанодисков, внедренную в нее. Разработана теоретическая модель для прогнозирования положения дополнительных аномалий Рэля [1], порождаемых присутствием ФК. В работе рассматривается ФК с элементарной ячейкой, которая состоит из двух слоев: (SiO₂) с толщиной $d_a = 120$ нм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.1$ и (ZrO₂) с толщиной $d_b = 70$ нм и $\epsilon_b = 4.16$. Будем использовать ФК, состоящий из шести элементарных ячеек и дефектного слоя между ними (с толщиной $L = 1230$ нм и $\epsilon_{def} = 2.5$).

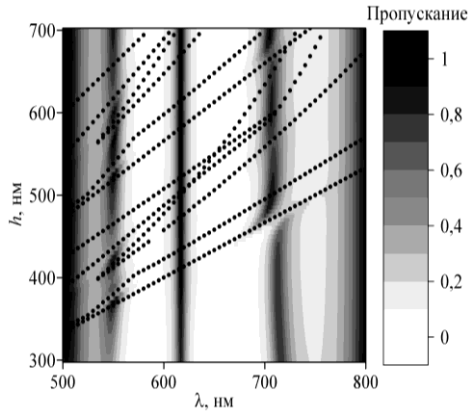


Рис. 1 Спектры пропускания исследуемой структуры для разных значений периода решетки h , точками показаны аномалии Рэля

Двумерный массив золотых нанодисков высотой 50 нм и радиусом 40 нм с периодом h , внедрен в центр дефектного слоя ФК. На рис. 1 представлены спектры пропускания исследуемой системы для разных периодов решетки h .

Из рис. 1 видно, что множественные расщепления дефектных мод ФК возникают для разных h только для нечетных мод. При этом четная мода остается неизменной, несмотря на то, что ее частота почти совпадает с частотой локализованного плазмонного резонанса. Кроме того, на рис. 1 показаны положения как обычных аномалий Рэля, так и дополнительных аномалий, которые проявляются вследствие взаимодействия НЧ в решетке друг с другом посредством отражений от слоев ФК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта №18-42-240013.

Список литературы

1. Rayleigh L. On the Dynamical Theory of Gratings // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1907. V. 79. 532. P. 399-416.
2. Markel V.A. Divergence of dipole sums and the nature of non-Lorentzian exponentially narrow resonances in one-dimensional periodic arrays of nanospheres // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics. 2005. V. 38. No. 7. P. L115-L121.

С.А. ПЕНЬКОВ, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА МОБИЛЬНЫХ ТРИПЛЕТНЫХ МОЛЕКУЛ В НАНОПОРАХ С ПАРАМАГНИТНЫМИ ЦЕНТРАМИ

Приведены результаты расчетов средней скорости бимолекулярной реакции и соответствующих ей спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) при различных параметрах наноструктурированной среды. Выявлены зависимости ширины линий ОДМР от параметров наноструктурированной среды.

S.A. PEN'KOV, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

OPTICALLY DETECTED MAGNETIC RESONANCE OF MOBILE TRIPLET STATES IN NANOCAVITY WITH PARAMAGNETIC CENTERS

Average bimolecular reaction rates and ODMR spectra are calculated at various parameters of a nanostructured medium. The dependencies of the ODMR line width on parameters of the nanostructured medium were found.

Оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР) может давать информацию о характере движения активных молекул (способных формировать спектры ОДМР), и особенностях структурирования среды, в которой они находятся [1]. Кроме того, ОДМР является удобным методом анализа электронных процессов и бимолекулярных фотореакций, которые сопровождаются люминесценцией, например таких как электрон-дырочная аннигиляция в полупроводниках, триплет-триплетная аннигиляция (ТТА) экситонов и триплет-дублетное тушение (ТДТ).

В данной работе рассмотрен случай диффузии возбужденных триплетных молекул с коэффициентом диффузии D_M в сферической нанопоре радиуса R . Простой для анализа и расчетов случай возникает при локализации одной из частиц в центре нанопоры. Функция Грина [2]:

$$G(r, \theta, t | r', 0) = \frac{3}{4\pi R^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[-\frac{D_M}{R^2} (\mu_n^{(0)})^2 t \right] \frac{J_{1/2}(\mu_n^{(0)} r / R) J_{1/2}(\mu_n^{(0)} r' / R)}{2\pi R^2 \sqrt{rr'} J_{1/2}^2(\mu_n^{(0)})}$$

уравнения диффузии в сферических координатах с условием отражения на стенках нанопоры позволяет использовать в этом случае следующее квадратурное выражение для средней скорости бимолекулярной реакции (рис. 1)

$$\chi(t | r') = 4\pi \int_0^R U(r)G(r, t | r')r^2 dr .$$

Реакции ТТА и ТДГ обуславливают спиновую зависимость люминесценции, которая осуществляется только из парного состояния определенной мультиплетности. Спектры ОДМР (рис. 2) определяются как [3]:

$$\gamma(B) = \frac{W(B, 0) - W(B, B_1)}{W(B, 0)} ,$$

где $W(B, 0) = \int_0^\infty \text{Tr}\{\hat{P}, \hat{\rho}(t|0)\} \chi(t) dt$, $W(B, B_1) = \int_0^\infty \text{Tr}\{\hat{P}, \hat{\rho}(t|B_1)\} \chi(t) dt$ – вероятности актов ТТА без СВЧ поля и при воздействии СВЧ поля амплитуды B_1 , $\rho(t | B_1)$ - спиновая матрица плотности пары реагентов, \hat{P} - оператор проектирования на разрешенное для реакции спиновое состояние пары.

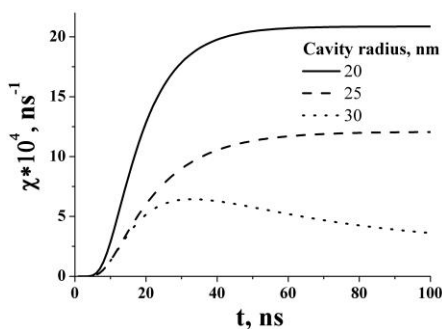


Рис. 1. Временные зависимости средней скорости бимолекулярной реакции для нанопор различного радиуса

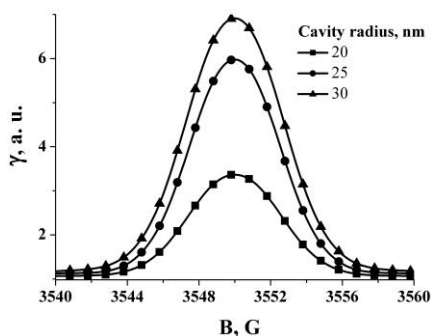


Рис. 2. Спектры ОДМР для нанопор различного радиуса

Список литературы

1. Robinson M.E., Ng J.D., et. al. // Anal. Chem. 2018. V. 90 (1). P. 769-776.
2. Кучеренко М.Г. // Вестник ОГУ. 2017. № 7. С. 97-104.
3. Pen'kov S.A., Kucherenko M.G. // Proc. IX Russian-Japanese Confer. Chem. Physics of Molecules and Polyfunc. Mater. Orenburg, 2018. P. 44-46.

В.Р. БИЛЫК, А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА, Г.Б. ГАЛИЕВ¹,
Е.А. КЛИМОВ^{1,2}, П.П. МАЛЬЦЕВ¹, С.С. ПУШКАРЁВ¹

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

¹*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва*

ПЛАЗМОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРОВ И ДЕТЕКОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе экспериментально продемонстрировано увеличение генерации и детектирования терагерцового излучения плазмонными фотопроводящими антеннами. Показано влияние кристаллографического среза подложек на эффективность терагерцовых антенн.

V.R. BILYK, A.M. BURYAKOV, E.D. MISHINA, G.B. GALIEV¹,
E.A. KLIMOV¹, P.P. MALTSEV¹, S.S. PUSHKAREV¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow

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

PLASMONIC STRUCTURE BASED ON LOW-TEMPERATURE GaAs AS GENERATOR AND DETECTOR THz-RADIATION

In this work experimentally demonstrated increase of THz generation and detection efficiency by the plasmonic photoconductive antennas. Shown that crystallographic orientation of films influence to efficiency of the terahertz antennas.

Целью работы является экспериментальное исследование эффективности генерации и детектирования излучения терагерцового частотного диапазона фотопроводящими плазмонными антеннами [1], нанесенными на мультислойные пленки низкотемпературного арсенида галлия.

Эксперимент был выполнен с использованием лазерной системы с длиной волны 800 нм и длительностью импульса 100 фс. Принцип детектирования ТГц-излучения основан на методе электрооптического стробирования [2, 3] широкого терагерцового импульса короткими фемтосекундными лазерными импульсами.

В эксперименте были исследованы 4 типа топологии фотопроводящих антенн: структуры с плазмонными решетками с периодами 500, 250 и 100 нм и структура без плазмонной решетки (рис. 1). Зазор между

электродами на всех антеннах составлял 20 мкм. Показано, что максимальное значение интенсивности генерации и чувствительности детектирования ТГц излучения наблюдалось на структурах с плазмонной решеткой 100 нм. Также благодаря особенностям кристаллической структуры плёнок LT-GaAs, образующимся при использовании несингулярной подложки GaAs (111)A для эпитаксиального роста плёнок, плёнки i-LT-GaAs/n-GaAs на подложках GaAs (111)A проявляют лучшие показатели при генерации и детектировании по сравнению с плёнками i-LT-GaAs/n-GaAs на подложках GaAs (100).

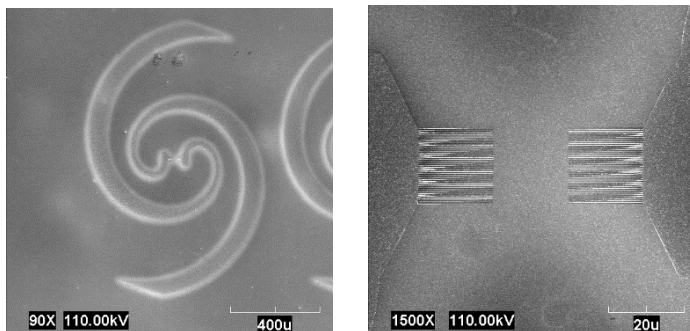


Рис. 1. Дизайн и плазмонная структура фотопроводящих антенн

Список литературы

1. Berry C.W., et. al. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes // Nat. Commun. Nature Publishing Group, 2013. V. 4. P. 1610-1622.
2. Kovalev S.P., Kitaeva G.Kh. // JETP Lett. 2011. V.94 (2). P.95.
3. Winnewisser C., et. al. Electro-optic detection of THz radiation in LiTaO₃, LiNbO₃, and ZnTe // Applied Physics Letters. 1997. V. 70. № 23. P. 3069-3071.

А.Э. АКМАЛОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ,
И.С. КРЮКОВА, И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ,
А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СЛОЁВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

На основе результатов использования метода матриц переноса с учётом дисперсии и поглощения терагерцового (ТГц) излучения созданы структуры, состоящие из слоёв пористого кремния. Изготовленные структуры имеют локальные минимумы и максимумы в ТГц спектрах отражения. При помощи установки для исследования и регистрации ТГц-изображений со спектральной идентификацией получены спектры отражения исследуемых структур в диапазоне от 0,5 ТГц до 2,1 ТГц. Наличие пиков в полученных спектрах позволяет рассматривать пористый кремний в качестве материала для создания фотонных кристаллов с фотонными запрещёнными зонами в терагерцовом диапазоне.

A.E. AKMALOV, K.I. KOZLOVSKII, G.E. KOTKOVSKII,
I.S. KRIUKOVA, I.L. MARTYNOV, E.V. OSIPOV,
A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

AN INVESTIGATION OF THE TERAHERTZ REFLECTION SPECTRA OF STRUCTURES BASED ON POROUS SILICON LAYERS

Structures consisting of porous silicon layers were created based on the results of using the transfer matrix method taking into account the dispersion and absorption of terahertz (THz) radiation. The fabricated structures have local minima and maxima in the THz reflection spectra. The reflection spectra of structures in the range from 0.5 THz to 2.1 THz were obtained using a setup for the study and registration of THz images with spectral identification. The presence of peaks in the obtained spectra allows us to consider porous silicon as a material for creating photonic crystals with photonic band gap in the terahertz range.

Наличие спектральных линий в терагерцовом (ТГц) диапазоне для ряда веществ [1] создаёт необходимость в разработке устройств и

структур (в том числе фотонных кристаллов), предназначенных для соответствующих спектральных исследований.

Использование метода матриц переноса с учётом дисперсии и поглощения в пористом кремнии позволяет вычислять спектры отражения многослойных структур на его основе в терагерцовом диапазоне. На основе результатов использования указанного метода изготовлены двухслойная и четырехслойная структуры, имеющие локальные минимумы и максимумы в ТГц спектрах отражения.

Для определения спектров отражения в диапазоне от 0,5 до 2,1 ТГц использовалась установка для исследования и регистрации ТГц-изображений со спектральной идентификацией [2] (рис. 1).

Спектры отражения, полученные экспериментально и при помощи метода матриц переноса, имеют хорошее соответствие (рис. 2 и 3). В случае четырехслойной структуры в области частоты 1,1 ТГц наблюдается пик в спектре отражения, соответствующий фотонной запрещенной зоне.

Таким образом, пористый кремний можно рассматривать в качестве материала для изготовления фотонных кристаллов с фотонной запрещённой зоной в ТГц диапазоне.

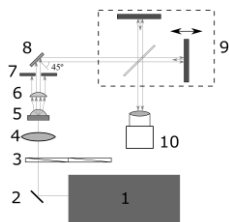


Рис. 1. Схема стенда:
1 - лазер, 2 - поворотное зеркало, 3 - оптико-механический модулятор, 4 - линза, 5 - фотопроводящая антенна, 6 - линза, 7 - диафрагма, 8 - исследуемый образец, 9 - интерферометр Майкельсона, 10 - терагерцовая видеокамера

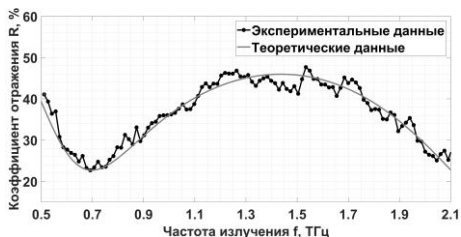


Рис. 2. Спектр отражения двухслойной структуры

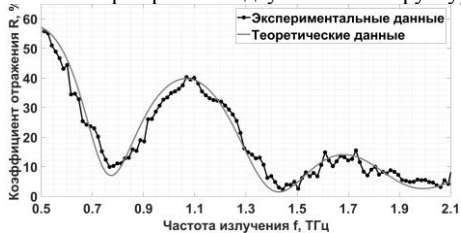


Рис. 3. Спектр отражения четырехслойной структуры

Список литературы

1. Chen J., et. al. // Optics express. 2007. V. 15. No. 19. P. 12060-12067.
2. Акмалов А.Э. и др. // Сб. трудов 9-й конф. Мокеровские чтения. 2018. С. 116-117.

А.В. ГОРБАТОВА, М.В. ВАСИНА, Д.И. ХУСЯИНОВ,
А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕМНОГО И МОНОСЛОЙНОГО КРИСТАЛЛОВ WSe₂

Получены временные и спектральные характеристики терагерцевых (ТГц) сигналов, генерируемых мультислойным и монослойным кристаллитами WSe₂. Ширина ТГц частотного спектра в исследуемых кристаллах составила ~ 3,5 ТГц. Показано, что нормированная амплитуда ТГц излучения в монослойном WSe₂ на два порядка выше, чем в объемном кристалле. На основании проведенных спектральных и азимутально-угловых исследований установлено, что основной вклад в ТГц генерацию связан с эффектом оптического выпрямления.

A. V. GORBATOVA, M. V. VASINA, D. I. KHUSYAINOV,
A. M. BURYAKOV, E. D. MISHINA

MIREA – Russian Technological University, Moscow

SURFACE TERAHERTZ RADIATION GENERATED BY BULK AND MONOLAYER WSe₂

The temporal and spectral characteristics of terahertz (THz) signals generated by the bulk and monolayer WSe₂ were obtained. The THz bandwidth in the WSe₂ was 3.5 THz. The normalized amplitude of THz signal in the monolayer WSe₂ was two orders of magnitude higher than in the bulk crystal. As a result of spectral and azimuthal-angular studies it was established that the main contribution to the THz generation is associated with the effect of optical rectification

В данной работе исследовались параметры генерации ТГц-излучения генерации в двух образцах: объемном кристалле и монослойной пленке WSe₂. Данный материал относится к классу двумерных полупроводниковых дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ). В последние годы они привлекают к себе всё большее внимание, благодаря уникальным оптическим и электрическим свойствам [1, 2]. Монослой ДПМ характеризуются прямой запрещенной зоной в видимой области частотного спектра и высокой подвижностью носителей заряда, и поэтому находят применение в устройствах фотоники и оптоэлектроники нового поколения [2].

Возможность применения ДПМ в качестве генераторов ТГц излучения была продемонстрирована в работах [3, 4]. WSe_2 – один из наиболее перспективных двумерных ДПМ, он обладает большой подвижностью носителей заряда и относительно небольшой запрещенной зоной, что делает его более привлекательным для применений в быстрых оптических устройствах.

В данной работе методом ТГц спектроскопии временного разрешения получены временные формы ТГц импульсов, генерируемых в мультислойном и монослойном кристаллах WSe_2 . Методом фурье-преобразования получены частотные спектры генерируемых ТГц сигналов. Исследуемые кристаллы генерируют ТГц излучение с шириной спектра $\sim 3,5$ ТГц. Показано, что нормированная амплитуда ТГц излучения в монослойном WSe_2 на два порядка выше, чем в объемном кристалле. Для ТГц-излучения, генерируемого в монослойном WSe_2 , получена азимутально-угловая зависимость сигнала. Установлено, что механизм генерации ТГц излучения в двумерной пленке WSe_2 связан с эффектом оптического выпрямления. С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics, было проанализировано распределение электрического поля оптической накачки в монослое WSe_2 в зависимости от толщины SiO_2 . Показано, что зависимость имеет периодичный характер.

Работа поддержана грантом централизованного фонда РТУ МИРЭА № НИЧ-42, и грантом РФФИ (код 18-32-00886).

Список литературы

1. Eda G., Yamaguchi H., Voiry D., Fujita T., Chen M., Chhowalla M. Photoluminescence from chemically exfoliated MoS_2 // Nano Lett. 2011. V. 11. № 12. P. 5111–5116.
2. Tian H., Chin M.L., Najmaei S., Guo Q., Xia F., Wang H., Dubey M. Optoelectronic devices based on two-dimensional transition metal dichalcogenides // Nano Res. 2016. V. 9. № 6. P. 1543–1560.
3. Huang Y., Zhu L., Zhao Q., Guo Y., Ren Z., Bai J., Xu X. Surface optical rectification from layered MoS_2 crystal by THz time-domain surface emission spectroscopy // ACS Applied Materials & Interfaces. 2017. V. 9. № 5. P. 4956–4965.
4. Si K., Huang Y., Zhao Q., Zhu L., Zhang L., Yao Z., Xu X. Terahertz surface emission from layered semiconductor WSe_2 // Applied Surface Science. 2018. V. 448. P. 416–423.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН¹

*Институт ядерной энергетики, Сосновый Бор, Ленинградская обл.,
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ

В рамках универсальной поляритонной модели интерпретированы экспериментальные результаты по формированию упорядоченных структур разрушения конденсированных сред под действием импульсов терагерцового излучения.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN¹

*Nuclear Engineering Institute, Sosnovy Bor, Leningrad region
¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

UNIVERSALITY OF POWERFUL POLARIZED TERAHERTZ RADIATION INTERACTION WITH CONDENSED MATTER

Published experimental data about the interaction of intense terahertz laser radiation with matter are interpreted based on universal polariton model of laser-induced condensed media damage.

При облучении кремниевых пластин наносекундными импульсами терагерцового излучения (ТГИ) лазера на свободных электронах (FEL) (диапазон длин волн λ (50÷82) мкм) с плотностями энергии Q до 32 Дж/см² обнаружено образование периодических структур разрушения поверхности монокристаллического кремния (решеток g), ориентированных поляризацией излучения [1] $g \perp E$, E – тангенциальная проекция вектора напряженности электрического поля лазерного излучения. Периоды образующихся решеток $d \ll \lambda$ и $d < \lambda/4$.

Для объяснения причин образования структур предлагается использовать универсальную поляритонную модель (УПМ) лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред и нелинейную математическую модель формирования пространственных периодов структур [2]. Показано, что результаты [1] хорошо объясняются в рамках этих моделей как результат интерференции падающей волны с возбуждаемыми ею канальными (клиновыми) поверхностными плазмон поляритонами (ППП). Образование решеток с периодами, заметно

меньшими величинами дифракционного оптического предела в ТГц диапазоне, облегчается необходимостью достижения заметно меньших критических концентраций свободных носителей, меньшим влиянием теплопроводностного сглаживания тепловой интерференционной решетки. При низких $Q = 13$ Дж/см² и $\lambda = 53$ мкм минимальная величина периода составила $d = 0,4$ мкм и в рамках УПМ может быть описана формулой $d = \lambda / (2k\xi) = 0.4$ мкм для $\xi \approx 1,035$, $k = 64$, где ξ – действительная часть показателя преломления канального (клинового) ППП для границы раздела *плазма полупроводника–воздух*. Поскольку для $\lambda = 53$ мкм $d = 0,4$ мкм $\ll \lambda/4$, то наблюдается нелинейное преодоление линейного дифракционного оптического предела (критерия Аббе) для ТГИ [3].

Существенно субволновые структуры были обнаружены при многоимпульсном разрушении тонких алюминиевых пленок линейно поляризованным лазерным ТГИ фемтосекундной длительности, в виде системы периодических микротрещин с $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}$ [4]. При нормальном падении излучения наблюдалось формирование ортогональной системы из двух решеток, ориентированных поляризацией излучения. Нами предложено физическое объяснение явления формирования ортогональных решеток трещин на основе УПМ, отличное от предложенной авторами [4]. Под действием серии импульсов линейно поляризованного ТГИ ($\lambda \approx 206,5$ мкм, $\tau = 100$ фс, $Q \approx 80$ мДж/см², $N = 600$) формировались решетки трещин разрушения тонких алюминиевых пленок с $\mathbf{g} \perp \mathbf{E}$ и $d \approx 16$ мкм [4], $d_{\text{теор}} = \lambda / k\eta \approx 13$ мкм, $k = 16$, $\eta \approx 1$. Здесь η – действительная часть диэлектрической проницаемости границы раздела металл–воздух для (ППП). В пределах трещины (внутри трещины) образовывались аномальные решетки $\mathbf{G} \perp \mathbf{E}$ с минимальным измеренным периодом $D \approx 1,3$ мкм, $D_{\text{теор}} = \lambda / k\xi$, $k = 2^7$, $\xi \approx 1,2$ [1, 3].

Предложено объяснение формированию упорядоченных структур, ориентированных поляризацией ТГИ, на основе УПМ. Минимальные периоды сформированных решеток более чем на два порядка меньше величины, даваемой линейным критерием Аббе.

Список литературы

1. Irizawa A., Suga S., et.al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. P. 251602.
2. Макин В.С., Макин Р.С., Воробьев А.Я. и др. // В сб. статей «Нелинейность в современном естествознании». М. Издательство ЛКИ, 2009. С. 303-322.
3. Макин В.С. и др. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. С. 641.
4. Agranat M.B., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 085704.

М.Г. КУЧЕРЕНКО, Т.М. ЧМЕРЕВА, В.М. НАЛБАНДЯН
Оренбургский государственный университет

МАГНИТНЫЙ КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ СПЕКТРОВ КОМПОЗИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ С ЭКСИТОНОГЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Рассчитаны магнитные дихроичные спектры поглощения циркулярно-поляризованного света композитными наночастицами со структурами «кор-оболочка» и «бисферический кластер» при наличии в таких системах компонентов с экситонными модами. Обнаружены трансформации МКД-спектров, обусловленные экситон-плазмонным взаимодействием в композитах.

M.G. KUCHERENKO, T.M. CHMEREVA, V.M. NALBANDYAN
Orenburg State University

MAGNETIC CIRCULAR DICHROISM SPECTRA OF COMPOSITE NANOPARTICLES WITH EXCITONOGENEOUS COMPONENTS

The magnetic dichroic absorption spectra of circularly polarized light are calculated by composite nanoparticles with core-shell and bispherical cluster structures in the presence of components with exciton modes in such systems. Transformations of MCD spectra due to the exciton-plasmon interaction in composites have been found.

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к композитным наносистемам, включающим в себя магнитные, плазмонные и/или экситоногенные компоненты. Это связано с возможностью их широкого практического использования в магнито- и биосенсорике, оптических устройствах обработки и хранения информации, световых модуляторах и дефлекторах.

В данной работе рассчитаны спектры магнитного кругового дихроизма (МКД) двуслойных наночастиц и их бинарных кластеров со структурой «кор-оболочка», при условии, что либо одна из частиц кластера целиком, либо ее кор или оболочка образованы из экситоногенных материалов – непроводящих кристаллоподобных сред (напр. молекулярных J-агрегатов). Тензор $\epsilon_{mn}^{(1)}(\omega)$ диэлектрической проницаемости однородного ферромагнетика с вектором намагниченности \mathbf{M} на частоте ω переменного монохроматического поля $E(i\omega t)$ может быть записан в

виде $\varepsilon_{mn}^{(1)}(\omega) = \varepsilon_f(\omega)[\delta_{mn} + iQ(-\delta_{m1}\delta_{n2} + \delta_{m2}\delta_{n1})]$, где Q – параметр Фохта, $\varepsilon_f(\omega) = 1 - \omega_{pl}^2 / [\omega(\omega + i\gamma_f)]$, а ω_{pl}, γ_f – его плазменная частота и коэффициент диссипации. Диэлектрическая проницаемость экситоногенной среды $\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_0 + f^2 / [\omega_{exc}^2 - (\omega + i\Gamma)^2]$, а ω_{exc}, Γ – частота перехода и скорость распада экситона, соответственно. Тензор дипольной поляризуемости шарового слоистого композита с анизотропной сердцевиной использовался в виде [1]

$$\begin{aligned} & \vec{\mathbf{A}}(\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}), \varepsilon_2(\omega), \varepsilon_3) = \\ & \left[(\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) + 2\varepsilon_2(\omega))(\varepsilon_2(\omega) - \varepsilon_3) + (\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) - \varepsilon_2(\omega))(2\varepsilon_2(\omega) + \varepsilon_3) \xi^3 \right] R_2^3 \quad (1) \\ & \times \left[(\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) + 2\varepsilon_2(\omega))(\varepsilon_2(\omega) + 2\varepsilon_3) + 2(\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) - \varepsilon_2(\omega))(\varepsilon_2(\omega) - \varepsilon_3) \xi^3 \right]^{-1}, \end{aligned}$$

где $\vec{\varepsilon}_1(\omega | \mathbf{M}) = \{\varepsilon_{mn}^{(1)}(\omega)\}$; $\xi = R_1 / R_2$ – отношение радиуса ферромагнитного кора к общему радиусу композита вместе с его оболочкой. Расчет скорости поглощения света правой (r) и левой (l) круговой поляризации $W^{(r,l)}(\omega | \mathbf{M}) \sim \text{Im} \left[\mathbf{E}_0^{r,l*}(\omega) \vec{\mathbf{A}}(\omega | \mathbf{M}) \mathbf{E}_0^{r,l}(\omega) \right]$ производится как на основе выражения (1), так и с помощью тензора поляризуемости двухчастичного кластера в дипольном приближении

$$\begin{aligned} & \vec{\mathbf{A}}_{cl}(\omega) = \left[\mathbf{I} - \vec{\alpha}_1(\omega) \vec{\alpha}_2(\omega) \vec{G}(\mathbf{r}) \vec{G}(\mathbf{r}) \right]^{-1} \times \\ & \left\{ \vec{\alpha}_1(\omega) \left[\mathbf{I} + \vec{\alpha}_2(\omega) \vec{G}(\mathbf{r}) \right] + \vec{\alpha}_2(\omega) \left[\mathbf{I} + \vec{\alpha}_1(\omega) \vec{G}(\mathbf{r}) \right] \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

где $\vec{\alpha}_1(\omega), \vec{\alpha}_2(\omega)$ – тензоры поляризуемостей частиц кластера; $\mathbf{I}, \vec{G}(\mathbf{r})$ – единичный тензор и диадическая функция Грина точечного диполя [2].

Расчеты МКД спектров $\Delta W(\omega) = W^{(r)}(\omega) - W^{(l)}(\omega)$ произведены для ряда сферических слоистых нанокompозитов с различными сочетаниями материалов кора и оболочки, а также для двухчастичных кластеров с экситоногенными компонентами. Обнаружены дополнительные спектральные максимумы, связанные с экситонными резонансами композитов, а также деформации полос, вызванные экситон-плазмонным взаимодействием.

Список литературы

1. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // J. Opt. Technol. 2018. V. 85. P. 524-530.
2. Kucherenko M.G., Nalbandyan V.M. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 136-142.

О.Ф. ЗАДОРОЖНЫЙ, В.Н. ДАВЫДОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ТРЕУГОЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЫ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОФИЛЯ

Рассматривается энергетический спектр квантовой ямы (КЯ), полученной совмещением двух квантовых ям треугольной формы разной толщины и наклона. Из условия Бора-Зоммерфельда найдены энергии уровней размерного квантования по всей глубине комбинированной ямы. Установлена возможность управления положением нижнего уровня энергии синфазным изменением наклона как нижней, так и верхней треугольной ямы (ТКЯ), а также управления плотностью уровней энергии по всей глубине квантовой ямы комбинированного профиля.

O.F. ZADOROZHNY, V.N. DAVYDOV

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

ENERGY SPECTRUM OF TRIANGULAR QUANTUM WELL WITH COMPOSITE PROFILE

We consider the energy spectrum of a quantum well (QW) obtained by combining two triangular quantum wells (TQW) of different thickness and inclination. From Bohr-Sommerfeld conditions found the energy levels of the quantum-size throughout the depth of the combined quantum well. The possibility of controlling the position of the lower energy level in-phase tilting both the lower and top triangular quantum wells, and the space between energy levels control from over the complete thickness of the triangular quantum well with composite profile.

Большинство светодиодов на основе полупроводниковых гетероструктур используют КЯ прямоугольной формы. Однако эта форма КЯ имеет существенные недостатки, наиболее значимым из которых является нерациональное использование объема квантовой ямы: с ростом номера состояния резко увеличивается зазор между соседними уровнями.

Это приводит к низкой высокой плотности электронных состояний в КЯ и, как следствие, низкому КПД. В ТКЯ плотность состояний увеличивается с ростом номера состояния (рис.1), что полезно для управления спектром и мощностью излучения светодиода.

Целью данной работы является исследование спектра электронных состояний в КЯ яме, полученной комбинированием двух ям треугольной формы с разными углами наклона и разными толщинами.

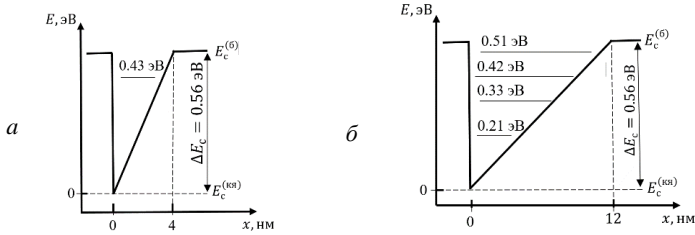


Рис. 1. Зонная диаграмма ТКЯ

Положение уровней энергии в ТКЯ с комбинированным профилем (рис. 2) может быть найдено при рассмотрении квазиклассического приближения Бора-Зоммерфельда [1]. В результате получено выражение:

$$E_n = \sqrt[3]{\left[\frac{3n\pi\hbar q F_1}{\sqrt{2m_1}} - \sqrt{\frac{2m_2 F_1}{2m_1 F_2}} \left((F_2 a_2 q + F_2 a_1 q - \frac{E_a F_2}{F_1})^{\frac{3}{2}} - E_0^{\frac{3}{2}} \right) + F_2 a_2 q^{\frac{3}{2}} \right]^2}, \quad (1)$$

где: F_1 – потенциал первого барьера F_2 – потенциал второго барьера m_1, m_2 – эффективные массы электрона в нижней и верхней квантовой яме, a_1 и a_2 – толщина КЯ в направлении ее роста, n – номер уровня, отсчитываемый от дна ямы, E_a – глубина нижней КЯ. Анализ спектра ТКЯ комбинированного профиля при равенстве эффективных масс в ямах показал, что изменение наклона верхней и нижней квантовой ямы может как разрезать, так и уплотнять спектр уровней энергии, а также менять положения первого возбужденного состояния. Наклон нижней квантовой ямы влияет на положения первого возбуждённого состояния, тогда как наклон верхней квантовой ямы влияет на плотность спектра. Полученные результаты могут быть использованы при разработке топологий квантовых ям в светодиодных источниках когерентного и не когерентного излучения, изготавливаемых на основе соединений $A^{III}N$, обладающих большим полем спонтанной поляризации.

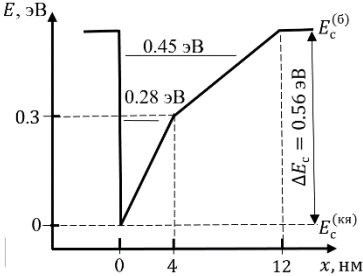


Рис. 2. Зонная диаграмма ТКЯ комбинированного профиля

на плотность спектра. Полученные результаты могут быть использованы при разработке топологий квантовых ям в светодиодных источниках когерентного и не когерентного излучения, изготавливаемых на основе соединений $A^{III}N$, обладающих большим полем спонтанной поляризации.

Список литературы

1. Мартинес-Дуарт Д.М. Мир материалов и технологий. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. 2007.
2. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008.

Н.Ж. ЖЕЕНБАЕВ, Г. РЫСКУЛ КЫЗЫ, А.М. НУРСЕИТОВА

*Институт физико-технических проблем и материаловедения
им. акад. Ж. Жеенбаева НАН Кыргызской Республики, Бишкек*

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ СОДЕРЖАНИЙ ВЕЩЕСТВА

Предложен высокочувствительный эмиссионный спектрометр на базе двухструйного плазматрона ДГП-50М, спектрографа ДФС-13, многоканального оптического регистратора спектра (МОРС-9). Содержание золота в пробах, полученное на представленной установке методом атомно-эмиссионного спектрального анализа, составило 0.2 г/т.

N.J. JEENBAEV, GULZAT RYSKUL KYZY, A.M. NURSEITOVA

*Academician J. Jeenbaev Institute of Physical & Technical Problems and Materials
Science of the NAS of the Kyrgyz Republic. Bishkek*

HIGHLY SENSITIVE EMISSION SPECTROMETER FOR DETERMINATION OF MATTER'S SMALL CONTENT

On the basis of two-jets plasmatron DGP-50M, spectrograph DFS-13, multichannel optical spectra registrar (MORS-9) highly sensitive emission spectrometer is suggested. Using developed technical set, gold content 0.2 g/t was obtained by method of atomic-emission spectral analysis.

Решение задач определения содержаний золота, серебра, платины и других драгоценных металлов методами спектрального анализа, например в ореолах рассеяния, становится возможным во многом за счет использования высокоточной и многофункциональной современной научной аппаратуры, включая высокочувствительные эмиссионные спектрометры [1, 2]. В настоящей работе результаты экспериментальных исследований, направленные на получение максимальной интенсивности линии золота (Au I 267.595 нм) показали, что возможностям измерения его малых концентраций, наиболее полно отвечает вариант высокочувствительного спектрометра, сочетающий: модернизированный двухструйный плазматрон ДГП-50М, спектральный прибор высокой разрешающей силы ДФС-13 (со сменной дифракционной решеткой 600 или 1200 штр./мм) и многоканальный регистратор спектра на базе

фотоэлектронной кассеты с 9 ПЗС без мертвых зон. Общий вид высокочувствительного спектрометра представлен на рис. 1.

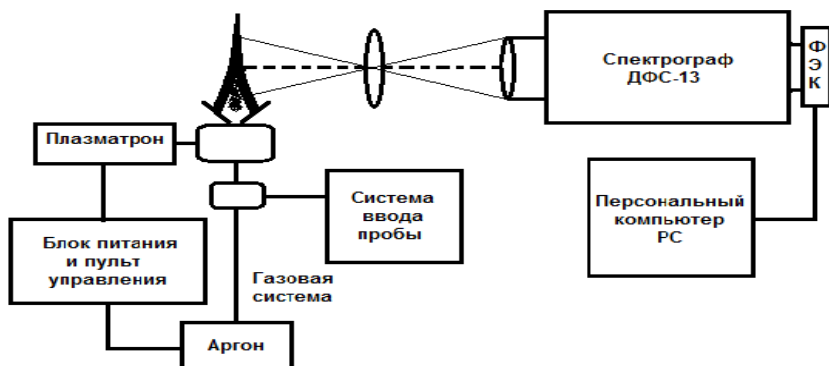


Рис. 1. Схема предложенного высокочувствительного спектрометра

Предлагаемый спектрометр обладает следующими характеристиками: сила тока – 50-55А, расстояние между соплами двухструйного плазмотрона – 9 мм, расход плазмообразующего газа – 2.5 л/мин, расход транспортирующего газа – 1 л/мин, обратная дисперсия – 1-2 $\text{\AA}/\text{мм}$, спектральный диапазон – 150-950 нм, используемая компьютерная программа - WINDOWS 7.

Результаты измерений содержания золота в пробах, полученные методом атомно-эмиссионного спектрального анализа при использовании предложенного нового варианта спектрометра, составили 0.2 г/т. Достигнутая чувствительность спектрометра, более чем на порядок величины превышает значения среднего содержания золота в коренных месторождениях золота на территории Кыргызстана и в несколько раз превышает результаты измерений содержания золота в потоке плазмы двухструйного плазмотрона ДПП-50, полученных ранее [3].

Список литературы

1. Apolickii V.N. // Zavodskaia laboratoria. Diagnostika materialov. 2010. V. 76 (2). P. 3-9.
2. Shabanova E.V., Bus'ko A.E., et. al. // Zavodskaia laboratoria. Diagnostika materialov. 2012. V. 78 (1-II). P. 24-33.
3. Urmanbetov K., Jeenbaev J., et. al. // Izvestia NAN KR. 1996. V. 4. P. 17-19.

Д.А. АГАФОНОВА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ БОРАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ХРОМА

Работа посвящена исследованию оптических и люминесцентных свойств боратных стекол, легированными ионами хрома. Были получены стекла, содержащие разную концентрацию хрома, и измерены их спектры поглощения и люминесценции после проведения термообработки. Впервые были измерены кривые затухания люминесценции хромосодержащих стекол.

D.A. AGAFONOVA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

THE STUDY OF THE SPECTRAL PROPERTIES OF BORATE GLASSES DOPED WITH CHROMIUM IONS

The work is devoted to the study of optical and luminescent properties of borate glasses doped with chromium ions. Glasses containing different concentrations of chromium were obtained and their absorption and luminescence spectra were measured after heat treatment. For the first time, the luminescence decay curves of chromium-containing glasses were measured.

Расширение диапазона работы эффективных волоконных усилителей и лазеров в видимую область спектра (600-750 нм) требует создания новых материалов, активированных люминесцентными центрами, способными работать в этом диапазоне. С точки зрения оптических свойств особый интерес представляют наноразмерные кристаллы, которые содержат примесные ионы переходных металлов. Данные объекты могут быть получены в стеклообразных матрицах. В данной работе применяется метод их получения, основанный на контролируемой нуклеации нанокристаллов в матрице стекла, путем изотермической обработки стекла при определенных температурах [1].

На данный момент кристаллы рубина активно применяются в качестве лазерной среды в медицине. Но в связи с дороговизной сырья и сложной технологией создания актуальной задачей сейчас является получения его аналога, которым могут являться стекла, легированные ионами хрома[2].

Были синтезированы стекла состава $12,5\text{K}_2\text{O}-12,5\text{Li}_2\text{O}-25\text{Al}_2\text{O}_3-50\text{B}_2\text{O}_3$, содержащие разную концентрацию ионов хрома. Хром был введен в

состав в виде оксида Cr_2O_3 . Синтез происходил в корундовых тиглях при температуре $1400\text{ }^\circ\text{C}$ с перемешиванием расплава платиново-родиевой мешалкой. Спектры поглощения регистрировались на спектрофотометре Lambda 650 в диапазоне 300-850 нм, с шагом 0,1 нм и временем интеграции 1 с. Спектры люминесценции в видимой области и абсолютный квантовый выход были измерены на установке Absolute PL Quantum Yield Measurement System (фирма Hamamatsu), включающей в себя ксеноновую лампу, интегрирующую сферу, спектрометр и монохроматор. Кривые затухания в максимумах полосы люминесценции были измерены на установке, в которой излучение импульсного лазера с длиной волны 532 нм возбуждает люминесценцию в образце, сигнал от которого регистрируется приемником, и на осциллографе наблюдается кривая затухания люминесценции.

Проводилась изотермическая обработка исходных образцов стекла выше температуры кристаллизации нанопазы в течении двух часов. Результаты рентгенофазового анализа показали, что в результате термообработки в матрице стекол выделилась кристаллическая фаза $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$. Средний размер кристаллических частиц составил порядка 15-25 нм.

Были измерены спектры поглощения и спектры люминесценции, которые оказались схожими с люминесценцией кристалла рубина в области R-линий в связи с выделением после термообработки в матрице стекла кристаллической фазы $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$. Интенсивность люминесценции в области 700 нм с увеличением концентрации хрома возрастает.

Впервые были измерены кривые затухания люминесценции хромсодержащих стекол, и получена зависимость времени жизни от концентрации ионов хрома. При увеличении концентрации хрома происходит уменьшение квантового выхода и времени жизни люминесценции, что вызвано концентрационным тушением.

Список литературы

1. Бабкина А.Н., Горбачев А.Д., Зырянова К.С., Никоноров Н.В., Нурыев Р.К., Степанов С.А. Исследование влияния окиси лития на спектральные свойства калиевоалюмоборатных стекол, активированных ионами хрома // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. № 3. С. 337-343.
2. Горбачев А.Д., Никоноров Н.В., Степанов С.А., Нурыев Р.К., Ширшнев П.С. Исследование оптических и люминесцентных свойств калиево-алюмоборатных стекол, активированных ионами хрома Cr^{3+} // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1(101). С. 191-194.

А.А. ГРИГОРЬЕВА, В.В. ГОРБЯК, А.И. СИДОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЕКОЛ С СЕРЕБРОМ: ВЛИЯНИЕ УФ-ОБЛУЧЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Проведен анализ спектров комбинационного рассеяния фототерморефрактивных силикатных стекол с серебром и их модификации при УФ-облучении и термообработках. Исследовались характерные спектральные полосы в области 130, 500 и 1100 см⁻¹. Показано, что при внешнем воздействии в стекле происходят структурные изменения, связанные с перераспределением заряда, модификацией молекулярных кластеров и изменением концентрации дефектов. Проведено сравнение со спектрами аналогичных стекол без серебра.

A.A. GRIGORIEVA, V.V. GORBYAK, A.I. SIDOROV

ITMO University, Saint-Petersburg

RAMAN SPECTROSCOPY OF PHOTOTHERMOREFRACTIVE SILVER SILICATE GLASSES: THE INFLUENCE OF ULTRAVIOLET IRRADIATION AND HEAT TREATMENT

An analysis was conducted on the Raman spectrums of photothermorefractive silver silicate glasses and their modifications after ultraviolet irradiation and heat treatments. The characteristics spectral bands in the frequency domain 130, 500, 1100 cm⁻¹ were studied. It was shown that structural changes are associated with charge redistribution, modifications of molecular clusters and changes in defect concentration in glass exposed to external influences. A comparison was drawn with analogous glasses without silver.

Фототерморефрактивные (ФТР) силикатные стекла с серебром широко используются для записи объемных фазовых голограмм и обладают интенсивной люминесценцией в видимой области спектра [1]. Кроме серебра они содержат фотосенсибилизатор – ионы Ce^{3+} и восстановитель – ионы Sb^{5+} . УФ-облучение и термообработки позволяют существенно модифицировать их оптические свойства, тем самым расширяя их функциональные возможности. Изучение рамановских спектров ФТР-стекол позволяет получать новую информацию о закономерностях, происходящих в таких стеклах при УФ-облучении и термообработке.

В работе исследовались ФТР-стекла состава $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-NaF-NaCl}$ с добавками Ag_2O , CeO_2 и Sb_2O_3 , синтезированные в

Университете ИТМО. Для сравнения были синтезированы стекла аналогичного состава, но без серебра. УФ-облучение образцов проводилось с помощью ртутной лампы. Термообработки проводились при температуре 350 °С (ниже температуры стеклования) и 510 °С (выше температуры стеклования). Спектры комбинационного рассеяния измерялись с помощью рамановского спектрометра-микроскопа inVia (Renishaw).

Исследования показали, что в стекле без серебра в стекле присутствует широкая полоса в интервале частот 100-300 см⁻¹ с максимумом на $\nu = 121.5$ см⁻¹. Данная полоса связана с колебательными модами групп Na⁺-O, а также комплексов заряженных молекулярных кластеров (МК) Na_n⁺-O. УФ-облучение приводит к увеличению интенсивности этой полосы и смещению максимума на $\nu = 124.5$ см⁻¹. Аналогичная полоса присутствует в ФТР-стекле с серебром. Однако исходно ее максимум находится на $\nu = 136.7$ см⁻¹. Это свидетельствует о вкладе в данную полосу колебательных мод Ag⁺-O и комплексов Ag_n⁺-O. Как было показано в [2] натрий и серебро могут образовывать стабильные гибридные МК Ag_nNa_m. Поэтому их вклад в данную полосу также следует учитывать. После УФ-облучения амплитуда полосы увеличивается в 2 раза, и она смещается $\nu = 137.3$ см⁻¹, что свидетельствует об изменении зарядового состояния указанных комплексов. Термообработка при T = 350 °С приводит к дальнейшему увеличению амплитуды полосы и ее частотному сдвигу. Причиной этого является увеличение концентрации и размеров МК. В результате термообработки при T = 510 °С также происходит увеличение амплитуды полосы, однако ее максимум смещается в область меньших частот на $\nu = 125$ см⁻¹. При этом на спектре поглощения ФТР-стекла возникает полоса поглощения, соответствующая плазмонному резонансу наночастиц серебра. Изменения в рамановском спектре, в данном случае, указывают на уменьшение концентрации «крупных» МК вследствие их трансформации в наночастицы, а также на появление новых «малых» МК в результате термической диффузии подвижных ионов металла.

Список литературы

1. Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // Optical Materials. 2014. V. 36. P. 753-759.
2. Castro R.A., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Stolyarchuk M.V. Dielectric properties of silver-containing photo-thermo-refractive glass in temperature range of -50 to +250 °C: The role of hybrid molecular clusters // Journal of Non-Crystalline Solids. 2017. V. 461. P. 72-79.

А.Н. БАБКИНА, Д.А. АГАФОНОВА, Е.В. КУЛЬПИНА,
К.С. ЗЫРЯНОВА, К.В. ОРЕШКИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННЫЕ ТЕРБИЕМ И ЦЕРИЕМ

Представлены результаты исследования физико-химических и эксплуатационных свойств магнитооптических стекол на основе метафосфатной матрицы, легированных большой концентрацией тербия и церия. Показано, что с увеличением концентрации редкоземельных элементов уменьшается показатель преломления, увеличивается плотность и постоянная Верде стекол.

A.N. BABKINA, D.A. AGAFONOVA, E.V. KULJPINA,
K.S. ZYRYANOVA, K.V. ORESHKINA
ITMO University, Saint-Petersburg

TERBIUM AND CERIUM-DOPED MAGNETOOPTICAL PHOSPHATE GLASSES

The results of the study of the physicochemical and operational properties of magneto-optical glasses based on a metaphosphate matrix doped with a high concentration of terbium and cerium are presented. It is shown that with an increase in the concentration of rare-earth elements, the refractive index decreases, the density and the Verdet constant of glasses increase.

Эффект Фарадея, который имеет ряд существенных практических применений, – это поворот плоскости поляризации светового пучка, проходящего через прозрачную среду в магнитном поле. Магнитооптические материалы (кристаллы, стекла, пленки) перспективны для использования в современных высокотехнологичных устройствах, таких как датчики тока [1] и оптические изоляторы [2].

Парамагнитные стекла являются хорошими кандидатами для этих применений. Стекло с высокой концентрацией редкоземельных элементов (до 20 мол. %) обладает большим магнитооптическим вращением с высокой прозрачностью в видимой области спектра [3]. Однако постоянная Верде при этом становится незначительной в длинноволновой области.

Было синтезировано стекло состава $50 \text{P}_2\text{O}_5 - x \text{Re}_2\text{O}_3 - (25-x) \text{La}_2\text{O}_3$ (где $\text{Re} = \text{Tb}, \text{Ce}$, $x = 0, 5, 10, 15, 20, 25$ мол. %). Синтез проходил в

корундовых и платиновых тиглях при температуре 1450 °С. Показатель преломления стекол был получен для видимой области на рефрактометре Аббе. Спектры поглощения (рис. 1) регистрировались на двулучевом спектрофотометре Lambda 900 (Perkin Elmer) в диапазоне от 300 нм до 3000 нм. Постоянная Верде была определена с помощью стандартной экспериментальной установки, состоящей из источника излучения, поляризатора, катушки индуктивности (175 мТл), анализатора и приемника излучения. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV показало, что в стеклах отсутствуют кристаллические включения. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием калориметра STA 449F1 Jupiter (Netzsch) были определены температуры стеклования, которые составили для всех видов стекол порядка 570-580 °С.

С увеличением концентрации редкоземельных элементов показатель преломления стекол уменьшается с 1.575 до 1.532 для тербиевых стекол, и с 1,536 до 1,526 для цериевых стекол. Постоянная Верде прямо пропорционально зависит от содержания редкоземельных примесей и максимальна для стекол с 0 мол. % La_2O_3 .

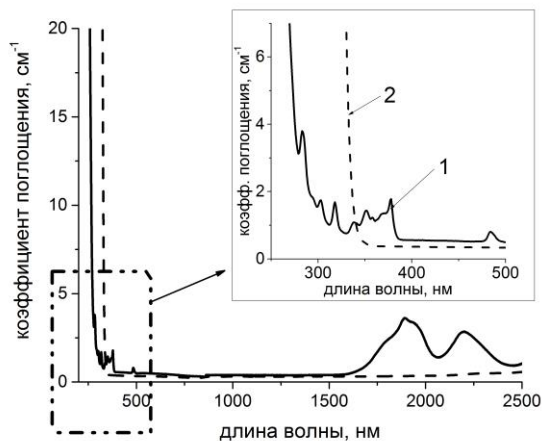


Рис. 1. Спектры поглощения фосфатных стекол с 25 мол. %: 1 - Tb_2O_3 , 2 - Ce_2O_3

Список литературы

1. Shen Y, Lu Y, et. al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. V. 389. P. 180.
2. Starobor A, Zheleznov D., et. al. // Opt. Com. 2016. V. 358. P. 176.
3. Ballato J, Snitzer E // Applied Optics. 1995. V. 34. P. 6848.

Д.А. НАЗАРОВА, А.И. НЕМЦЕВ, О.А. ПОДСВИРОВ,
А.И. СИДОРОВ¹, У.В. ЮРИНА

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СЕРЕБРА ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Приведены экспериментальные результаты электронного облучения с энергиями электронов 5 и 50 кэВ серебросодержащих лантано-фосфатных стекол. Показано, что серебро в стекле содержится преимущественно в виде нейтральных молекулярных кластеров, концентрация которых в облученной области значительно возрастает. Этот процесс сопровождается возникновением люминесценции за пределами облученной зоны.

D.A. NAZAROVA, A.I. NEMTSEV, O.A. PODSVIROV,
A.I. SIDOROV¹, U.V. URINA

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University
¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

ELECTRON-BEAM MODIFICATION OF OPTICAL PROPERTIES OF PHOSPHATE GLASSES WITH HIGH CONCENTRATION OF SILVER

The results of experimental study of silver-containing lanthanum-phosphate glasses, modified by electron irradiation with energy $E = 5$ and 50 keV and thermal treatment are presented. It is shown that silver is contained in glass mainly as subnanosized neutral molecular clusters (MCs) and their concentration increase in the irradiated zone. This process is accompanied by the appearing of luminescence outside this zone.

Неорганические стекла, содержащие металлические наночастицы благородных металлов, активно используются в фотонике, сенсорике и устройствах записи информации. Ранее было выяснено, что электронное облучение стекол, содержащих ионы металлов (~ 0.5 мол. %), даже при комнатной температуре приводит к образованию сферических металлических наночастиц. Целью данной работы является исследование формирования стекол с высоким содержанием серебра (17-30 мол. %).

Были изучены лантан-фосфатные стекла системы $\text{La}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$, легированные Ag_2O , с концентрациями 17(PG17) и 30 (PG30) мол. %. Электронное облучение производилось при комнатной температуре и энергии электронов 5-50 КэВ. Доза облучения – 50 мКл/см². Термическая обработка, стимулирующая рост частиц, после облучения проводилась в течение 1 часа при температуре 410 °С.

Электронное облучение с $E = 5$ КэВ приводит к возникновению сплошной полупрозрачной серебряной пленки на поверхности стекла для PG17 толщиной порядка 30 нм, для PG30 – 60 нм, а также отмечается увеличение оптической плотности более, чем в пять раз. Для случая $E = 50$ КэВ зона облучения приобретает желто-коричневый цвет. Кроме того, наблюдается увеличение оптической плотности и возникновение на спектре двух полос поглощения (370 и 530 нм), обусловленных наличием нейтральных серебряных молекулярных кластеров. Термическая обработка образцов при температуре, превышающей температуру стеклования, приводит к появлению в спектрах оптической плотности полос плазмонного поглощения, характерных для наночастиц серебра. Для $E = 5$ КэВ полоса представляет собой комбинацию двух полос при 390 и 420 нм. Для $E = 50$ КэВ имеется одна полоса с максимумом при 420 нм. Для PG30 отмечается большая амплитуда полос поглощения, а также возникновение полосы плазмонного поглощения вне облученных электронами областей. Образцы первоначально не обладали люминесценцией в видимой области спектра. После электронного облучения появляется желтая люминесценция в виде кольца вокруг облученной зоны и сплошного круга под ней. Возникновение люминесценции свидетельствует о переходе заряженных молекулярных кластеров серебра в нейтральное состояние.

В результате проведенного исследования было показано, что электронное облучение фосфатных стекол с высокой концентрацией серебра приводит к пространственному перераспределению серебра в стеклах, вызванных полевой миграцией ионов серебра. Описанные результаты могут быть использованы для создания наноплазмонных приборов и устройств записи информации.

Список литературы

1. Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V.A., Ussov O.A., Vostokov A.V. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. V. 268. № 19. P. 3103-3106.

З.Т. НГО, В.В. НГО, А.И. СИДОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФОСФАТНЫХ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ

В данной работе показаны результаты исследования фосфатных стекол с содержанием серебра 30 мол.% и без серебра. Были измерены и проанализированы спектры оптической плотности и комбинационного рассеяния. Исследовано влияние ультрафиолетового (УФ) излучения на спектры.

D.T. NGO, V.V. NGO, A.I. SIDOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

RAMAN SPECTROSCOPY OF PHOSPHATE SILVER-CONTAINING GLASSES

This paper shows the results of studies of phosphate glasses with a silver content of 30 mol.% And without silver. The spectra of optical density and Raman scattering were measured and analyzed. The effect of ultraviolet (UV) radiation on the spectra was studied.

Серебросодержащие стекла серебра представляют практический интерес в таких областях как нанопластика и наноплазмоника. Свойства наночастиц и молекулярных кластеров серебра влияют на характеристики стекол, что позволяет создавать различные приспособления на их основе: сенсоры, наноплазмонные волноводы и другие устройства [1].

В качестве объекта исследования на основе: $30\text{Ag}_2\text{O}-12.5\text{Ta}_2\text{O}_5-57.5\text{P}_2\text{O}_5$ и $30\text{Na}_2\text{O}-12.5\text{La}_2\text{O}_3-57.5\text{P}_2\text{O}_5$. Спектры оптической плотности и комбинационного рассеяния снимались с помощью: спектрофотометра Lambda 650 (Perkin-Elmer) и рамановского спектрометра.

Рамановский спектр на рис. 1 состоит из ряда полос с максимумами на волновых числах 1214, 1148, 1091,1010, 695 и 235 cm^{-1} . Спектр характеризуется двумя интенсивными пиками на частотах 1148 и 695 cm^{-1} . Согласно литературным данным, полосы на частотах 695 и 1148 cm^{-1} соответствуют симметричным колебаниям мостиковой связи Р-О-Р и симметричным растяжением связи PO_2 в метафосфатах соответственно [2]. На рис. 2 приведен спектр оптической плотности фосфатных стекол с серебром до и после УФ-облучения.

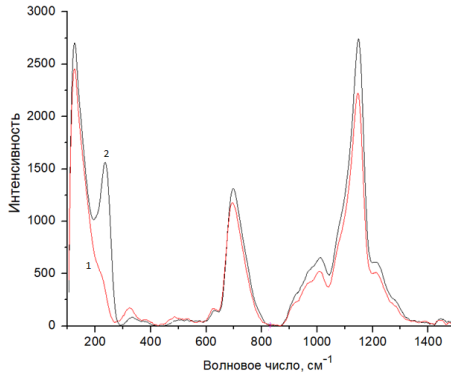


Рис. 1. Рамановские спектры фосфатных стекол с серебром:
1 - исходное стекло, 2 - после УФ-облучения

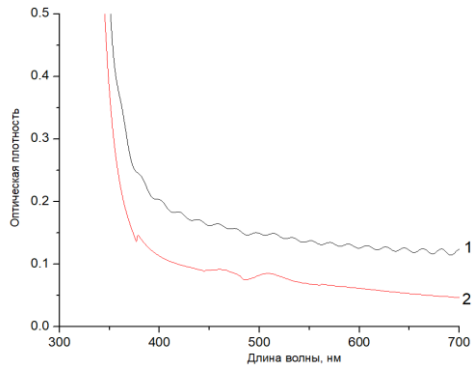


Рис. 2. Оптическая плотность фосфатных стекол с серебром:
1 - исходное стекло, 2 - после УФ-облучения

УФ-облучение образцов приводит к изменению свойства, значит к изменению рамановских спектров. Видно, что положения максимумов смещаются, а его интенсивность тоже изменяется. После УФ-облучения полоса на волновом числе 235 см^{-1} исчезает, оптическая плотность уменьшается в видимой области.

Список литературы

1. Ефимов А.М. // Journal of Non-Crystalline Solids. 1997. V. 209. P. 209-226.
2. Брунов В.С., Подсвиров О.А., Сидоров А.И., Чураев Д.В. // Журнал технической физики. 2014. V. 84. P. 112-117.

В.В. НГО, З.Т. НГО, А.И. СИДОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОСФЕРОИДОВ В СТЕКЛЕ

В работе исследованы оптические свойства сфероидальных наночастиц серебра, сформированных методом термического разложения нитрата серебра в упорядоченной системе из стеклянных волокон. Было сопоставление с теоретическим расчетом для оценки размера наночастиц серебра.

V.V. NGO, D.T. NGO, A.I. SIDOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

FORMATION AND OPTICAL PROPERTIES OF ORIENTED SILVER SPHEROIDS IN GLASS

The optical properties of silver spheroidal nanoparticles formed by the thermal decomposition of silver nitrate in an ordered system of glass fibers were studied. There was a comparison with a theoretical calculation for estimating the size of silver nanoparticles.

В настоящее время наночастицы серебра находят широкое применение во многих областях науки и техники. Они входят в состав покрытий для поглощения солнечной энергии, используются в качестве катализаторов химических реакций, применяются в создании химических биосенсоров и т.д. [1]. Особенности оптические свойства наночастиц серебра обусловлены эффектом поверхностного плазмонного резонанса, который проявляется в возникновении интенсивной полосы поглощения в видимой области спектра. Причем, положение, амплитуда полосы и форма спектров поглощения металлических наночастиц зависят от их размера, формы и показателя преломления окружающей среды [2].

В данной работе исследовались оптические свойства наночастиц серебра, которые находятся в форме вытянутых сфероидов. Схема эксперимента представлена на рис. 1а. Пучок волокон из сода-лайм стекла закрепляются двумя пластинами кварцевого стекла; потом участок пучка волокон, лежащий между пластинами, смачивался раствором нитрата серебра. Образец подвергался термической обработке при температуре 800 °С в течение 30 минут. В результате, волокна расплавлялись, и

образовался тонкий слой стекла, содержащий наночастицы серебра. Спектр оптической плотности был получен с помощью спектрофотометра Lambda 650 (Perkin-Elmer).

На присутствие сфероидальных наночастиц серебра указывает вид спектра оптической плотности образца, на котором появляются две плазмонные полосы поглощения на 400 и 455 нм. Их появление связано с возникновением колебаний наночастицы вдоль длинной и вдоль короткой осей эллипсоида. Причем, расстояние между полосами и их амплитуды зависят от соотношения длинной и короткой осей сфероида и от поляризации излучения. Численное моделирование спектральной зависимости сечения поглощения наночастиц, проводившееся в дипольном квазистатическом приближении для сфероидальных наночастиц серебра с длинной осью 34 нм и с короткой осью 27 нм, дает аналогичный результат по сравнению с практически полученным результатом.

В следующей части работы проводилось исследование зависимости поглощения образца от состояния поляризации излучения. Были использованы линейно поляризованное излучение с длиной волны 405 нм и 450 нм – соответственно фиолетовый и синий лазеры. Образец вращался вокруг своей оси в пределах от 0° до 360° с шагом 10° (рис. 1b). Обнаружен эффект дихроизма и зависимость пропускания образца от поляризации излучения.

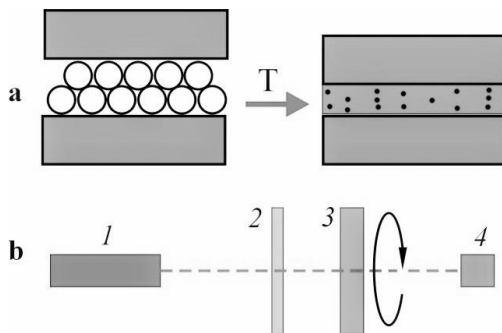


Рис. 1. Схема подготовки образца (a); схема эксперимента измерения: 1 - лазер, 2 - ослабитель, 3 - образец, 4 - фотодиод (b)

Список литературы

1. Eichelbaum M., Rademann K. // Adv. Funct. Mater. 2009. V. 19. P. 1.
2. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. // Нанопотоника и наноплазмоника. Учеб. пособие. СПб: Изд-во Университета ИТМО, 2014.

М.С. АШУРОВ, Е.А. ЕРЕМИНА, Т.В. ЛАПТИНСКАЯ,
С.О. КЛИМОНСКИЙ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ФОРМИРОВАНИЕ ДВУХУРОВНЕВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОЧАСТИЦ ПОЛИСТИРОЛА

Приведены результаты экспериментов по формированию двухуровневых дифракционных структур из сферических микрочастиц полистирола с помощью прерывистого движения мениска на вертикальной подложке. Полученные структуры состоят из параллельных однослойных полосок осажденных микрочастиц, повторяющихся с периодом 140-150 мкм, и пустых промежутков между ними. Внутри полосок наблюдается гексагональное упорядочение микрочастиц. Для обоих уровней упорядочения продемонстрировано наличие лазерной дифракции.

M.S. ASHUROV, E.A. EREMINA, T.V. LAPTINSKAYA,
S.O. KLIMONSKY

Lomonosov Moscow State University

THE FORMATION OF TWO-LEVEL DIFFRACTION STRUCTURES FROM POLYSTYRENE MICROSPHERES

The results of experiments on the formation of two-level diffraction structures from polystyrene microspheres by intermittent meniscus motion on vertical substrate are presented. The resulting structures consist of parallel monolayer stripes of deposited microspheres, repeated with a period of 140-150 μm and empty spaces between them. The microspheres are packed into a hexagonal structure inside the stripes. Laser diffraction patterns have been demonstrated for both levels of ordering.

Микросферная литография с использованием маски из коллоидных частиц предлагает недорогой метод для создания наноструктур. Применяется в различных областях физики, химии, биологии, микро- и наноэлектроники. Одним из применений может быть создание дифракционных структур для видимого и ультрафиолетового диапазонов спектра [1-3]. Дифракция света на упорядоченных структурах из коллоидных частиц хорошо известна. Однако наблюдение аналогичной дифракции в области длин волн, превышающих диаметр коллоидных частиц (ИК-диапазон), невозможно. Применение микросферной литографии для этой цели требует принципиально новых подходов.

Предложенный нами метод основан на прерывистом движении мениска в процессе испарения коллоидного раствора. Реализация такого движения позволила расширить пределы микросферной литографии в область периодов порядка сотен микрон. Монодисперсные частицы полистирола размером порядка 1 мкм были синтезированы методом безмульгаторной эмульсионной полимеризации с персульфатом калия в качестве инициатора. Осаждение проводили при разных температурах (рис. 1). Полоски осажденных микрочастиц имеют на рис. 1 черный цвет. По данным сканирующей электронной микроскопии (рис. 2), внутри полосок имеется гексагональное упорядочение микрочастиц.

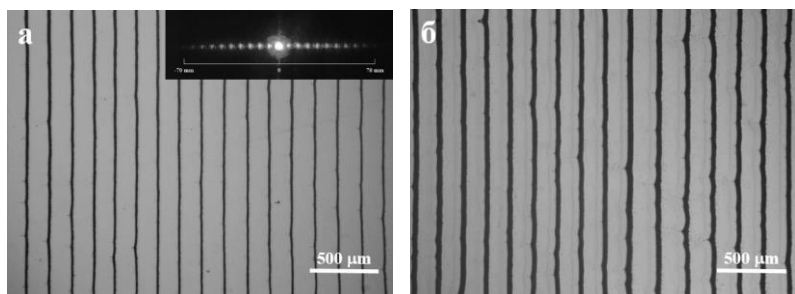


Рис. 1. Дифракционные структуры, полученные при разных температурах осаждения: 34 °С (а) (на вставке показана соответствующая картина лазерной дифракции, $\lambda = 632.8$ нм); 41 °С (б)

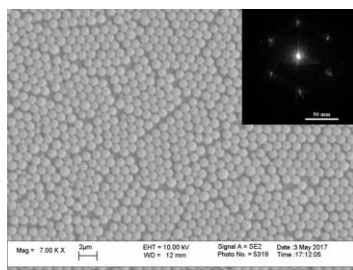


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение упаковки сферических микрочастиц внутри одной из полосок (на вклейке – соответствующая картина дифракции)

Список литературы

1. Lee W., Kim S., et al. // J. Colloid Interf. Sci. 2015. V. 440. P. 229.
2. Ashurov M.S., Klimonsky S.O., et. al. // Appl. Phys. A. V. 122. P. 1054.
3. Ashurov M., Eremina E., et. al. // Superlattices. and Microstructure. 2018. V. 120. P. 806.

В.А. ХАЛЯПИН, А.Н. БУГАЙ¹*Калининградский государственный технический университет
¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна***ТУННЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ И ПОДАВЛЕНИЕ
ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО
САМОРАССЕЯНИЯ**

С помощью метода моментов получено аналитическое выражение, описывающее смещение частоты импульса, обусловленное как вынужденным комбинационным рассеянием, так и туннельной ионизацией. Найдены условия стабилизации импульса.

V.A. KHALYAPIN, A.N. BUGAY¹*Kaliningrad State Technical University
¹Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna***TUNNEL IONIZATION AND SUPPRESSION
OF INTRAPULSE RAMAN SCATTERING**

We derive explicit analytic expressions for the evolution of spectral shift, caused by Raman scattering and photoionization. The analysis is based on the moment method. Conditions of pulse stabilization were obtained.

Уравнение, описывающее распространение квазимонохроматических импульсов при учете дисперсии третьего порядка, производной нелинейности, вынужденного комбинационного рассеяния и туннельной ионизации имеет вид [1]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} - i\gamma \psi |\psi|^2 - \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial}{\partial \tau} (\psi |\psi|^2) + \\ + i\gamma T_R \psi \frac{\partial |\psi|^2}{\partial \tau} + i\eta \psi \int_{-\infty}^{\tau} \Delta |\psi|^2 \Theta(\Delta |\psi|^2) d\tau = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ψ – огибающая поля импульса, ω – центральная частота импульса, β_2 – коэффициент групповой дисперсии, β_3 – коэффициент, характеризующий дисперсию третьего порядка. γ – коэффициент при кубической нелинейности, T_R – параметр, описывающие вклад вынужденного комбинационного саморассеяния (ВКС), η – характеризует

вклад ионизации, $\Delta|\psi|^2 = (|\psi|^2 - |\psi|_{th}^2), |\psi|_{th}^2$ – величина, соответствующая порогу туннельной ионизации, Θ – функция Хевисайда, τ – время в сопутствующей системе координат, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал.

Анализ динамики параметров импульса проводится на основе метода моментов [2]. Пробную функцию для огибающей поля выберем в виде

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 + i \left(\varphi - \Omega(\tau - T) - \frac{C}{2} \left(\frac{\tau - T}{\tau_p} \right)^2 \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь τ_p – длительность сигнала, C – определяет модуляцию частоты, T – характеризует добавку к групповой скорости. B – амплитуда сигнала. Решая систему для моментов, находим уравнение для длительности солитоноподобного сигнала

$$\tau'_p = \left(a - b\tau_p^2 \left(1 - \tau_p / \tau_{th} \right)^{3/2} \right) / \tau_p^3, \quad (3)$$

где $a = 8\beta_3 T_R / 15$, $b = 2\beta_3 \eta / 3\gamma$, τ_{th} – длительность сигнала, соответствующая пороговой интенсивности. Из (3) видно, что длительность импульса не меняется, когда правая часть (3) равна нулю.

Список литературы

1. Saleh M.F., Chang W., Holzer P., Nazarkin A., Travers J.C., Joly N.Y., Russell P.St.J., Biancalana F. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P.203902.
2. Santhanam J. // Opt.Commun. 2003. V.222. P. 413-420,

П.О. ЯКУШЕНКОВ^{1,2}¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва²АО «Ангстрем-Т», Зеленоград

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В электродинамике считается, что скорость света в веществе изменяется, однако в теории относительности скорость света во всех системах отсчета одинакова. Согласно ОТО, в веществе из-за межатомных и межмолекулярных полей траектория по координате времени искривляется и свету по координате времени надо пройти больший путь, и меняется не скорость, а время: $dt^{\wedge} = dt\sqrt{g_{00}}$, где g_{00} – компонента метрического тензора, значит диэлектрическую проницаемость и показатель преломления следует трактовать, как $n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{g_{00}}$.

P.O. YAKUSHENKOV^{1,2}¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow²JSC «Angstrom-T», Zelenograd

PERMITTIVITY IN TERMS OF GENERAL RELATIVITY THEORY

In electrodynamics the speed of light in dielectric changes, but in the general relativity theory the speed of light is the same in any system of reference. Following the general relativity theory, in dielectric the trajectory by the time coordinate curves, because of interatomic and intermolecular fields, and the light needs to go longer way by the time coordinate, and the speed doesn't changes, but the time changes: $dt^{\wedge} = dt\sqrt{g_{00}}$, where g_{00} is the component of the metric tensor, so the permittivity and the refractive index should be interpreted as $n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{g_{00}}$.

Общая теория относительности трактует гравитацию, как искривление пространства-времени, т. е. гравитация – это проявление действия искривления. Главное уравнение ОТО – это уравнение Эйнштейна: $R^{ab} - 0,5g^{ab}R = \frac{8\pi G}{c^4}T^{ab}$, где кривизна $R = g_{ab}R^{ab} = R_a^a = R_0^0 + R_1^1 + R_2^2 + R_3^3$, $R_{akb}^k = g_d^c R_{abc}^d = R_{ab}$ – тензор Риччи, R_{abc}^d – тензор Римана, g_d^c – метрический тензор, известные в дифференциальной геометрии; а T^{ab} – это тензор энергии-импульса-материи, по определению такой что $\delta S = \frac{-1}{2c} \int d^4x \sqrt{-g} T^{ab} \delta g_{ab}$, где $g = \det g_{ab}$, $S = \frac{1}{c} \int L d^4x$ – действие сил,

L – лагранжиан, известные в теоретической механике, $x = (x^0, x^1, x^2, x^3)$, где $dx^0 = cdt$.

Электрическое поле для не заряженной частицы дает вклад в вариацию действия $\delta S = \frac{-1}{8\pi c} \int d^4x \sqrt{-g} (\frac{1}{4} F^2 g^{kl} - F^{kl} F_m^l) \delta g_{kl}$, где F_{kl} – это тензор из компонентов электрических и магнитных полей, известный в теоретической физике; т. е. видно, что даже поле дает вклад в тензор энергии-импульса-материи $T^{kl} = \frac{-1}{4\pi} (F^{kl} F_m^l - \frac{1}{4} F^2 g^{kl})$, где $F^2 = F^{kl} F_{kl}$. Тогда из уравнения Эйнштейна следует, что поле дает вклад в искривление. Даже если рассмотреть метрику черной дыры в сферических координатах, тогда квадрат перемещения $ds^2 = (1 - \frac{r_g}{r})(dx^0)^2 - \frac{(dr)^2}{1 - \frac{r_g}{r}} - r^2((d\theta)^2 + \sin^2\theta(d\varphi^2))$,

где $r_g = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус; и если рассмотреть метрику заряженной черной дыры с зарядом Q в центре, тогда квадрат перемещения $ds^2 = (1 - \frac{r_g}{r} + \frac{q^2}{r^2})(dx^0)^2 - \frac{(dr)^2}{1 - \frac{r_g}{r} + \frac{q^2}{r^2}} - r^2((d\theta)^2 + \sin^2\theta(d\varphi^2))$,

$q^2 = GQ^2/c^4$. Попробуем оценить в цифрах диэлектрическую проницаемость, т. е. компоненту тензора g_{00} : напряженность поля в кристалле порядка $E = 10^9$ В/см. Среда не магнитная, $g_{00}F_i^0 = F_{0i}$; $F^2 = -2(E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)$; $T^{00} = \frac{-g_{00}}{8\pi} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)$, если подставить в уравнение Эйнштейна: $\frac{8\pi G}{c^4} \cdot \frac{-g_{00}}{8\pi} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) = R^{00} - 0,5g^{00}R$ и выразить через тензор Римана: $\frac{G}{c^4} g_{00} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) = -(R_{12}^{12} + R_{13}^{13} + R_{23}^{23})$, тогда если брать метрику заряженной черной дыры, то $R_{12}^{12} = R_{13}^{13} \sim \frac{-(1 - \frac{r_g}{r^2} + \frac{q^2}{r^2})r}{2r} = \frac{-(1 + \frac{q^2}{r^2})r}{2r}$,

$R_{23}^{23} = \frac{q^2}{r^4} - \frac{r_g}{r^2} = \frac{q^2}{r^4}$, тогда $\frac{G}{c^4} g_{00} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) \sim \frac{q^2}{r^4} - \frac{(1 + \frac{q^2}{r^2})r}{r} \sim \frac{q^2}{r^4}$, надо взять эквивалентное поле: $E = \frac{Q}{r^2} = 10^9$ В/см, тогда $\frac{G}{c^4} g_{00} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) = \frac{q^2}{r^4} = \frac{GQ^2}{r^4 c^4} = \frac{GE^2}{c^4}$, значит $g_{00} \sim 1$, что совпадает с

опытом, так как диэлектрическая проницаемость и показатель преломления тоже ~ 1 . Вообще, раз электромагнитным полем можно искривлять пространство-время, а гравитационное поле – это искривление пространства-времени, то гравитационное поле можно представить, как суперпозицию некоторых электромагнитных полей.

Список литературы

1. Вергелес С.Н. Основы ОТО: лекции. МФТИ, 2015.

Б.Б. АВЕРБУХ, И.Б. АВЕРБУХ

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В СРЕДЕ ИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КВАДРУПОЛЕЙ

Получены выражения для отраженного поля и поля в среде. Введен показатель преломления среды. Рассмотрено преломление на выходе из среды.

B.B. AVERBUKH, I.B. AVERBUKH

Pacific State University, Khabarovsk

PROPAGATION OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN A MEDIUM FROM LINEAR ELECTRIC QUADRUPLES

Expressions for the reflected field and field in the medium are obtained. The refractive index of the medium is introduced. Considered refraction at the outlet of the medium.

В настоящей работе процесс распространения монохроматической электромагнитной волны в метаматериале рассматривается с точки зрения молекулярной оптики. Среда представляется как диэлектрик, состоящий из периодически расположенных плоскопараллельных монослоев, состоящих из точечных электрических линейных квадрупольей. Все квадрупольные монослои лежат в плоскостях $xу$, пересекающих ось z в точках z_1, z_2, z_3, \dots . Расстояния между всеми монослоями по оси z одинаковы и равны a , причем $a \ll \lambda$, где λ - длина волны излучения. Линейные квадрупольи расположены вдоль оси z и представляют собой пары двух одинаковых электрических дипольей, направленных по одной прямой и осциллирующих в противофазе. Расстояние между центрами дипольей равно b . Дипольные моменты такой системы равны нулю, а электрический квадрупольный момент имеет одну отличную от нуля компоненту. Квадрупольи одного монослоя распределены неупорядоченно с плотностью N и не взаимодействуют между собой. Точечность квадрупольи означает, что его размеры много меньше расстояний между квадрупольями, а также величин a и λ , где λ - длина волны излучения. Поля квадрупольей учитываются полностью.

Поскольку внешнее поле распространяется вперед, рассматривается рассеяние последовательными монослоями, причем учитывается то, что каждый квадрупольный монослой находится в поле излучения других монослоев. Модель слоистой среды, рассматриваемая в данной работе, содержит много монослоев. Поэтому учитываются волны, отраженные от них, т.е. рассеянные ими назад. В работе получены выражения для отраженного средой поля, поля внутри среды в точках нахождения n -го монослоя, а также рассмотрено преломление на выходе из среды.

Пусть на первый монослой со стороны $z < z_1$ падает под углом α поляризованное в плоскости yz монохроматическое поле

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}),$$

$$\mathbf{H}_0 = E_0 \mathbf{e}_x \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r})$$

с частотой ω , волновым вектором $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ и вектором поляризации $\mathbf{e}_0 = -\mathbf{e}_y \cos \alpha + \mathbf{e}_z \sin \alpha$, где \mathbf{e}_y и \mathbf{e}_z определяют единичные векторы вдоль соответствующих осей.

Поля, рассеянные вперед первым монослоем, равны

$$\mathbf{E}_{10}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = P E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2),$$

$$\mathbf{H}_{10}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = P E_0 \mathbf{e}_x \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2),$$

где $P = 2\pi N D k k_{0y}$, $D = b A_d$, $A_d = A_d' - i A_d''$ - дипольная поляризуемость.

На второй монослой падают поля

$$\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{10} = F_q \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{0y} y_2 - ik_{0z} z_1 - ik_{2z}' a),$$

$$\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{10} = F_q \mathbf{e}_x E_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{0y} y_2 - ik_{0z} z_1 - ik_{2z}' a),$$

где $1 + P = F_q \exp(-i\varphi_q)$, а $k_{2z}' = k_{0z} + \varphi_q / a$ и $\varphi_q = \arctg[P'' / (1 + P)']$. И так далее. В работе показано, что в среде распространяется волна с волновым вектором $\mathbf{k}_2 = (0, k_{0y}, k_{2z}')$. Представив модуль вектора \mathbf{k}_2 в виде $k_0 n_q$, можно ввести показатель преломления среды n_q .

$$n_q = (1 + 2\xi \cos \alpha + \xi^2)^{1/2}, \quad \xi = \varphi_q / a k_0.$$

При нормальном падении волны ($k_{0y} = 0$) получаем $P = 0 = \xi$ и $n_q = 1$. Коэффициент пропускания Френеля равен единице, а коэффициент отражения - нулю.

А.А. МИТЮРЕВА, Д.В. СМIRНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ ИЗЛУЧАЮЩИХ УРОВНЕЙ КОНФИГУРАЦИИ 4p⁵5p АТОМА КРИПТОНА

Приведены сечения возбуждения электронным ударом из основного состояния уровней электронной конфигурации 4p⁵5p в атоме криптона. Данные получены на основе регрессионного анализа по имеющимся информационным источникам по указанному процессу.

A.A. MITYUREVA, D.V. SMIRNOV
Saint-Petersburg State University

EXCITATION BY ELECTRON IMPACT OF RADIATIVE LEVELS OF 4p⁵5p KRYPTON ATOM CONFIGURATION

The electron impact excitation cross sections from the ground state of krypton atom to the 4p⁵5p electron configuration levels are presented. The data was obtained on the base of regression analysis on the available information sources on the specified process.

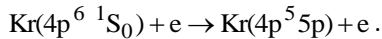
Сечения возбуждения электронным ударом важны для описания процессов, происходящих в различных средах, в том числе приводящих к излучению. По данному вопросу накоплен большой материал и возникает потребность извлечения конкретного результата из всего этого массива. Для этого нами разработана методика получения сечения, в которой используется информация из имеющихся данных по указанному процессу, включая результаты собственных измерений [1, 2]. Сечения находятся на основе регрессионного анализа по имеющимся данным с заданной параметрической функцией регрессии. Эта функция представляет сглаженное сечение, обладающее четырьмя характерными признаками – характером пороговой зависимости, величиной в максимуме, положением максимума, характером спада при больших энергиях. Соответственно, для передачи этих особенностей рассматривается четырехпараметрическая аппроксимация.

Мы используем аппроксимацию сечения возбуждения электронным ударом в виде

$$\sigma(E) = p_0 \left(\frac{u}{u+1} \right)^{p_1} (u + p_2)^{-p_3}, \quad u = \frac{E}{\Delta E} - 1,$$

где E – энергия электронов, ΔE – порог возбуждения, $p = (p_0, p_1, p_2, p_3)$ – параметры. Очень приближенно можно считать, что p_0 задает величину сечения, а параметр p_2 влияет на форму кривой $\sigma(E)$ 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 .

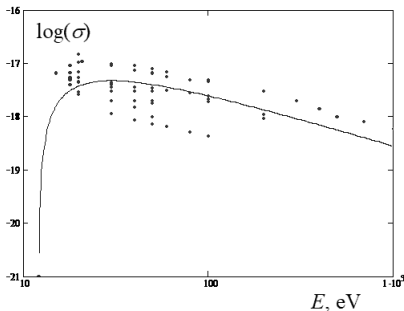
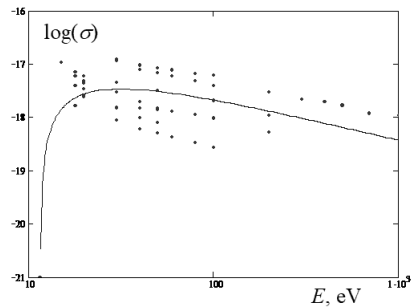
В данной работе мы рассматриваем сечения возбуждения электронным ударом из основного состояния уровней электронной конфигурации $4p^55p$ в атоме криптона



В табл. 1 приведены полученные значения параметров регрессии и относительная выборочная дисперсия результата D для уровней $2p_2$ и $2p_6$ (в обозначениях Пашена) электронной конфигурации $4p^55p$ атома криптона. На рис. 1 и 2 соответствующие сечения представлены в графическом виде. Эти данные относятся к так называемым эффективным сечениям электронного возбуждения, которые включают в себя оптические каскадные процессы заселения уровней.

Таблица 1

up level	D	p_0 10^{-16} cm^2	p_1	p_2	p_3
$2p_2$	0.46	0.59	2.74	0.12	1.10
$2p_6$	0.44	0.67	2.75	0.12	1.06

Рис. 1. Сечение уровня $2p_2$ Рис. 2. Сечение уровня $2p_6$

Список литературы

1. Митюрева А.А., Смирнов В.В. // Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-Мат. Науки. 2015. Вып. 4 (230). С. 48-60.
2. Митюрева А.А., Смирнов В.В. // Опт. и спектр. 2016. Т. 121. С. 864-870.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, О.Б. СУХОРУКОВА,
Р.В. КОНЕЕВ

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

КВАДРУПОЛЬНАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАССЕЙАНИИ ДВУХ ФОТОНОВ АТОМОМ

Теоретически предсказан эффект квадрупольной эмиссии при резонансном неупругом рассеянии двух рентгеновских фотонов многоэлектронным атомом. Дана количественная оценка величины наблюдаемого дважды дифференциального сечения рассеяния.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, O.B. SUKHORUKOVA,
R.V. KONEEV

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

QUADRUPOLE EMISSION IN THE SCATTERING OF TWO PHOTONS BY AN ATOM

Theoretically predict the appearance of quadrupole emission effect in resonant inelastic scattering of two x-ray photons by a many-electron atom. A quantitative estimate for the magnitude of the observed double differential cross section is given.

Создание рентгеновского лазера на свободных электронах (XFEL) открывает возможность исследования фундаментальных многоэлектронных процессов микромира [1]. К таким процессам, в частности, относятся процессы резонансного неупругого рассеяния двух фотонов многоэлектронным атомом. В данной работе мы строим нерелятивистский вариант квантовой теории одного из таких процессов – эффекта квадрупольной эмиссии при рассеянии двух рентгеновских фотонов электронами атома. В качестве объекта исследования взят атом Ne.

Результаты расчёта дважды дифференциального сечения рассеяния, $\sigma_{\perp}^{(2)} \equiv d^2\sigma_{\perp} / d(\hbar\omega_c) d\Omega_c$ ($\hbar\omega_c$ – энергия рассеянного фотона и Ω_c – пространственный угол его вылета), представлены на рис. 1. Поскольку $\sigma_{\perp}^{(2)}$ определено через матричный элемент j_0 – оператора (j_0 – сферическая функция Бесселя) эмиссионного перехода $1s_{1/2} \rightarrow 2s_{1/2} + \hbar\omega_c$ с $\Delta l = 0$ для орбитальных квантовых чисел вакансий,

то исследуемый процесс интерпретирован как эффект квадрупольной эмиссии. В области энергий падающего XFEL-фотона $\hbar\omega \in (I_{1s}, I_{1s} + 750)$ эВ (I_{1s} – энергия порога ионизации $1s$ – оболочки атома) видна ярко выраженная резонансная структура спектра рассеяния. Исследование угловой зависимости рассеянного излучения демонстрирует тот факт теории, что рассеяние двух XFEL-фотонов атомом Ne происходит преимущественно вперед (высокая пропускная способность атома).

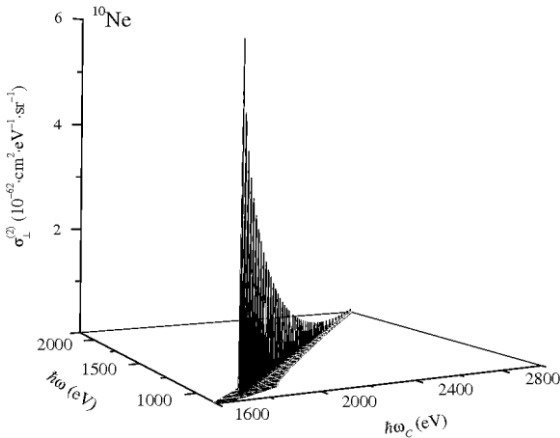


Рис. 1. Дважды дифференциальное сечение эффекта квадрупольной эмиссии для атома Ne в области энергии падающего линейно поляризованного (перпендикулярно плоскости рассеяния, \perp) XFEL-фотона $\hbar\omega \geq I_{1s}$. $\theta = 90^\circ$, $I_{1s} = 870.210$ эВ [2], естественная ширина распада $1s$ -вакансии $\Gamma_{1s} = 0.271$ эВ [3]

Для планируемой в ближайшие годы средней яркости излучения $N = 10^{22}$ [4] при, например, $\hbar\omega = 1$ кэВ, $\hbar\omega_c = 1.82$ кэВ и $\theta = 90^\circ$ получаем вполне доступную для измерения величину абсолютного значения вероятности эффекта квадрупольной эмиссии $C_N^2 \sigma_{\perp}^{(2)} \cong 2.59$ (Мб·эВ $^{-1}$ ·ср. $^{-1}$), где C_N^2 – биномиальный коэффициент.

Список литературы

1. Young L., et. al. // J. Phys. B. 2018. V. 51. P. 032003.
2. Pettersson L., et. al. // J. Electr. Spectr. Rel. Phenom. 1982. V. 27. P. 29.
3. Coreno M., et. al. // Phys. Rev. A. 1999. V. 59. P. 2494.
4. Yabashi M., Tanaka H. // Nat. Photon. 2017. V. 11. P. 12.

С.В. БОРОВЫХ, В.В. СМИРНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

РАСЧЁТ ДЕГРАДАЦИИ КАРТИНЫ ДИФРАКЦИИ МОЩНОГО, УЛЬТРАКОРОТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОЛЕКУЛЕ ВОДОРОДА

Рассматривается влияние интенсивности ультракороткого рентгеновского импульса на деградацию электронной плотности молекулы водорода и на картину дифракции рентгеновской волны. Для решения задачи используется разработанный ранее квазиклассический траекторный метод. Приводятся результаты расчёта автокорреляционных функций электронных плотностей для нескольких межъядерных расстояний.

S.V. BOROVYKH, V.V. SMIRNOV

Saint-Petersburg State University

EVALUATION OF THE DIFFRACTION PATTERN DEGRADATION IN THE HIGH-POWER ULTRASHORT X-RAY RADIATION FOR THE HYDROGEN MOLECULE

The influence of the ultrashort X-ray pulse intensity on the hydrogen molecule electron density degradation and on the X-ray diffraction pattern is considered. For the purpose of solving this problem the previously developed semiclassical trajectory method is used. Outcomes of the electron density autocorrelation functions calculations for several internuclear distances are presented.

С созданием и последующим развитием рентгеновских лазеров на свободных электронах [1], способных генерировать сверхинтенсивные и ультракороткие рентгеновские пучки когерентных фотонов, стали доступны новые возможности для изучения материи с пространственным и временным разрешением атомного масштаба. Особенно интересны рентгеновские лазеры в приложении к определению структуры неперIODических образцов, таких как вирусы [2], белки и молекулы.

Для расчётов эволюции систем под действием рентгеновского излучения используются различные методы такие, как уравнение Шредингера, функционал плотности и т.п. В нашей работе используется разработанный ранее квазиклассический траекторный метод [3], который позволяет описывать динамику всех электронов. Расчет включает два этапа: на первом рассчитываются классические траектории электронов в

фазовом пространстве, что позволяет найти динамику электронной плотности, а на втором вычисляется дифракционная картина и автокорреляционная функция (АКФ) электронной плотности. АКФ содержат информацию о структуре невозмущенного объекта.

В расчетах используется рентгеновский импульс мощностью вплоть до 10^{26} Вт/см² с длиной волны $\lambda = 10^{-9}$ см и характерным временем $\tau \sim 1$ фс. В качестве объекта рассматривается молекулярный водород при равновесном – $7.4 \cdot 10^{-9}$ см и неравновесных межъядерных расстояниях $11 \cdot 10^{-9}$ см и $15 \cdot 10^{-9}$ см. Была выбрана простейшая приближенная волновая функция молекулы водорода.

Результаты получены для несколько значений интенсивности, с целью оценить её влияние на деградацию объекта. На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета средней за импульс электронной плотности для равновесного межъядерного расстояния в слабом и сильном сверхатомном полях соответственно.



Рис. 1. Двумерная проекция электронной плотности H_2 , слабое поле

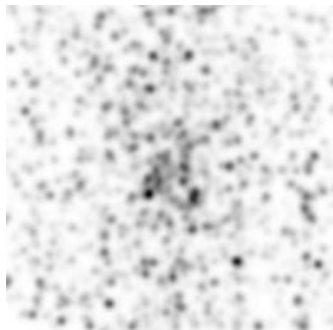


Рис. 2. Двумерная проекция электронной плотности H_2 , сильное поле

Список литературы

1. Neutzo R., Wouts R., Van Der Spoel D., Weckert E., Hajdu J. // Nature. 2000.
2. Gorkhover T., et. al. // Nat. Photonics. 2018. V. 12. P. 150-153.
3. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Rezikyan A.G., Smirnov V.V. // J. Phys. B. 2017. V. 50. № 19. P. 195601.

А.И. ЛИВАШВИЛИ, В.В. КРИШТОП, П.В. ВИНОГРАДОВА,
О.И. ЯЩУК

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК НАНОЖИДКОСТИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Изложены результаты теоретического исследования динамики концентрации наночастиц в наножидкости (коллоидной наносуспензии), облучаемой световым полем с равномерным профилем интенсивности. Найдены точные решения нелинейного относительно концентрации эволюционного уравнения. В исследуемом уравнении учтены концентрационные зависимости коэффициентов поглощения, теплопроводности и кинематической вязкости. Найдены условия, при которых реализуются режимы процессов с обострением.

A.I. LIVASHVILI, V.V. KRISHTOP, P.V. VINOGRADOVA,
O.I. YASHCHUK

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

NONLINEAR RESPONSE OF NANOFUIDS TO THE EFFECT OF THE LIGHT FIELD

The results of a theoretical study of the dynamics of the concentration of nanoparticles in a nanofluid irradiated by a light field with a uniform intensity profile are presented. The exact solutions of the nonlinear with respect to the concentration of the evolution equation are found. In the equation under study, the concentration dependences of the absorption coefficients, thermal conductivity and kinematic viscosity are taken into account. The conditions under which the modes of processes with exacerbation are realized are found.

В работе развиваются представления о процессах взаимодействия лазерного излучения с наножидкостью [1]. Так как процессы установления температуры происходят на 4-5 порядков быстрее диффузионных, то изучение последних ведётся на фоне стационарной температуры. Пренебрегаем, ввиду его малости, эффектом Дюфура и потоком частиц, связанным с их электрострикцией. При конструировании исследуемого уравнения учитываются как термодиффузионный поток (эффект Соре), так и концентрационная конвекция, которая в нашем приближении осуществляется с постоянной скоростью.

Основываясь на этих допущениях, нами получено нелинейное относительно концентрации эволюционное уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - mC \frac{\partial C}{\partial y} + pC^3 - C^2. \quad (1)$$

Здесь безразмерные переменные τ и y обозначают величины, пропорциональные соответственно времени и координате, а параметры m и p пропорциональны коэффициентам поглощения, термодиффузии, вязкости и теплопроводности. Такого типа уравнение принято называть уравнением Бюргерса-Хаксли [2]. Используя подстановку Коула-Хопфа, можно получить его точное решение:

$$C(y, \tau) = \frac{1}{p} \frac{a_1 - a_3 \exp(\lambda_{1,2} y + \lambda_{1,2}^2 \tau)}{a_1 \lambda_{1,2} y + a_2 - a_3 \exp(\lambda_{1,2} y + \lambda_{1,2}^2 \tau)}, \lambda_{1,2} = \frac{1}{p A_{1,2}}, A_{1,2} = \frac{m}{2p} (1 \pm \sqrt{1 + \frac{8p}{m^2}})$$

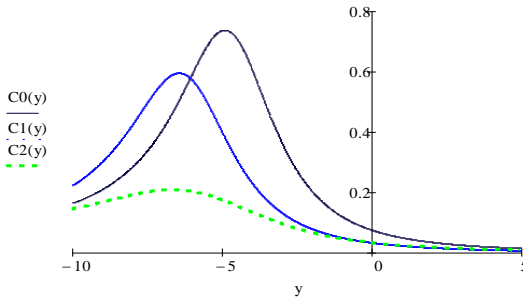


Рис. 1. График решения уравнения (1) в условных единицах

График решения приведён на рис. 1. Кривые построены в порядке возрастания времени. При этом, кривая C_0 отражает начальное условие $\tau = 0$. Видно, как происходит расплывание начального пространственного распределения частиц. Анализ решения показал, что в зависимости от значений постоянных в решении в системе возможны реализации режимов с «обострением» [3]. Как известно, подобные режимы свидетельствуют о наличии фазовых переходов в системе.

Список литературы

1. Livashvili A.I., et. al. // KnE Energy & Physics. 2018. V.3. №3. P.165-172.
2. Ефимова О.Ю., Кудряшов Н.А. // ПММ. 2004. Т. 68. № 3. С. 462-469.
3. Самарский А.А. и др. // Режимы с обострением для квазилинейных параболических уравнений. М: Наука. 1987.

Д.Н. АРХИПОВ, С.В. БОРОВЫХ, А.С. КОЖИНА,
А.А. МИТЮРЕВА, В.В. СМIRНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ФОТОИОНИЗАЦИИ АТОМА ЛИТИЯ В УЛЬТРАКОРОТКОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ

Вероятности фотоионизации атома лития в ультракоротком лазерном поле были рассчитаны на основе разработанного траекторного метода.

D.N. ARKHIPOV, S.V. BOROVYKH, A.S. KOZHINA,
A.A. MITYUREVA, V.V. SMIRNOV
Saint-Petersburg State University

EVALUATION OF THE PROBABILITIES OF PHOTOIONIZATION OF THE LITHIUM ATOM IN ULTRASHORT LASER FIELD

The probabilities of photoionization of the lithium atom by ultrashort laser field were evaluated on base of developed trajectory method.

Был рассмотрен процесс фотоионизации атома лития в ультракоротком лазерном поле. В основе вычислений лежит разработанный нами траекторный метод оценки вероятностей перехода [1-4]. Метод учитывает все порядки многофотонных процессов и межэлектронные корреляции. Вероятности фотоионизации были рассчитаны в широком диапазоне частот и интенсивностей поля. Диапазон частот соответствует энергиям фотонов 8 эВ - 8 КэВ и длинам волн 1-1500 Å. Диапазон значений поля соответствует плотностям потока энергии 10^6 - 10^{25} Вт/см². Такой диапазон параметров получаемый на основе единой методики затруднителен для других методов.

Мы использовали релятивистскую функцию Гамильтона. Рассматривался фотоимпульс с линейной поляризацией и гауссовой модуляцией. Используются атомные единицы, если не указано иное.

Результаты расчетов вероятности фотоионизации атома лития от величины поля показаны на рис. 1. Линии 1-4 соответствуют полной, одинарной, двойной и тройной ионизации соответственно. Величина поля представлена безразмерным параметром Фейсала $\chi = eA / p_0c$

(где A – амплитуда векторного потенциала $p_0 = \hbar/a_0$). Если $\omega\tau \gg 1$, то $\chi \sim 1/\gamma$, где γ – адиабатический параметр Келдыша. Параметр Фейсала $\chi \ll 1$ соответствует слабому полю, $\chi \sim 1$ соответствует промежуточному полю, $1 < \chi < c$ соответствует сильному сверхатомному полю с интенсивностью вплоть до релятивистской, и $c < \chi$ – полю с релятивистской интенсивностью. Расчеты сделаны для частоты поля излучения $\omega = 30$ ($\sim 0,8$ КэВ) и длительности импульса фотона $\tau = 30$ ($\sim 0,8$ фс).

Следует отметить, что данные о вероятности фотоионизации атома лития в сильном поле практически отсутствуют в литературе. В отличие от атомов водорода и гелия расчет лития на основе прямого численного решения нестационарного уравнения Шредингера (TDSE) выходит за рамки текущих вычислительных возможностей. Расчет TDSE для атома лития был проведен в [5] для упрощенной одномерной модели.

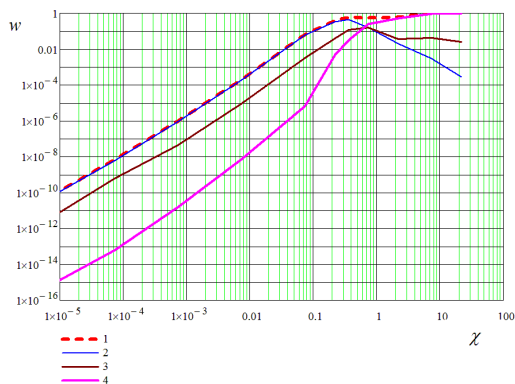


Рис. 1. Вероятности фотоионизации атома лития в зависимости от величины поля, линии 1-4 соответствуют полной, одинарной, двойной и тройной ионизации соответственно

Список литературы

1. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Opt. and Spectr. 2017. V. 123. P. 338-343.
2. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 1263-1266.
3. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Europ. Phys. J. D. 2015. V. 69. P. 190.
4. Bichkov A.B., Smirnov V.V. // Laser Phys. 2013. V. 23. P. 055302.
5. Ruiz C., Plaja L., Roso L. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 063002.

Л.Е. СЕМЕНОВА

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

**ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА
НА LO-ФОНОНАХ ПРИ ДВУХФОТОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ
ВБЛИЗИ КРАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ CdS**

В рамках экситонной модели рассматривается резонансное гиперкомбинационное рассеяние света на LO-фононах в кристалле CdS с учетом вкладов различных последовательностей промежуточных состояний.

L.E. SEMENOVA

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

**THE HYPER-RAMAN SCATTERING OF LIGHT
BY LO-PHONONS UNDER TWO-PHOTON EXCITATION
NEAR THE ABSORPTION EDGE IN A CdS CRYSTAL**

The resonant hyper-Raman scattering of light by LO-phonons in a CdS crystal is considered in the framework of the excitonic model, taking into account contributions of different sequences of intermediate states.

Гиперкомбинационное рассеяние (ГКР) света является нелинейным оптическим процессом, в котором при одновременном поглощении двух фотонов возбуждающего излучения происходит излучение одного фотона рассеянного света и изменяется колебательное состояние решетки кристалла. При приближении удвоенной энергии фотонов возбуждающего излучения к ширине запрещенной зоны полупроводника интенсивность ГКР увеличивается. Резонансное гиперкомбинационное рассеяние света было впервые обнаружено в CdS [1] и позже наблюдалось в ряде полупроводниковых кристаллов. Опубликовано несколько работ, в которых резонансное ГКР рассматривалось в рамках экситонной модели [2, 3]. Было показано, что основной вклад в сечение ГКР вносит фрелиховский механизм рассеяния, которому соответствует последовательность промежуточных экситонных состояний s - p - s , поскольку этот процесс описывается в рамках двухзонной модели и включает только дипольно-разрешенные переходы [2, 3].

Экспериментальные исследования резонансного гиперкомбинационного рассеяния света ранее проводились для кристалла

CdS, при этом была измерена зависимость интенсивности ГКР на LO-фононах от длины волны возбуждающего излучения [4]. Полученная зависимость в работе [5] объяснялась механизмом рассеяния, включающим двухфотонный переход в экситон s -типа. Однако позже анализ показал, что при геометрии рассеяния, используемой в эксперименте [4], процесс, связанный с двухфотонным дипольным переходом на s -экситонный уровень серии А, не вносит вклад в ГКР [6].

Представленная работа посвящена теоретическому исследованию резонансного ГКР света на LO-фононах в кристалле CdS структуры вюртцита. В качестве промежуточных состояний электронной системы рассматриваются экситоны Ванье, и учитывается только внутризонный фрелиховский механизм экситон-фононного взаимодействия. Предполагается, что процесс рассеяния происходит в центре зоны Бриллюэна. Рассматриваются состояния валентной зоны, полученные в работе [7], где, в частности, верхняя валентная зона определяется, в основном, p -состояниями с некоторым подмешиванием d -состояний.

Учитывая известную зонную структуру и правила отбора, несложно найти ненулевые матричные элементы дипольных межзонных переходов, а также параметров слабо-запрещенных переходов. Это позволило определить вклады различных последовательностей промежуточных экситонных состояний в резонансное ГКР. Таким образом, было показано, что механизм рассеяния, включающий двухфотонный дипольный переход в s -экситоны А серии, может вносить вклад в ГКР при геометрии рассеяния, используемой в эксперименте [4]. Однако его зависимость от поляризаций возбуждающего излучения (ϵ_L) и рассеянного света (ϵ_S) оказалась такой же, как и для последовательности промежуточных экситонных состояний s - p - s . Процесс рассеяния, связанный с двухфотонным переходом в s -экситоны В и С серий, в этом случае вносит вклад в ГКР при $\epsilon_S \parallel z$.

Список литературы

1. Поливанов Ю.Н., Саяхов Р.Ш. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30 (9). С. 617.
2. Garsia-Cristobal A., Cantarero A., Trallero-Giner C., Cardona M. // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. P. 10443.
3. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. С. 1048.
4. Maslov V.A., Ondriash K.K., et al. // Las. Phys. 1996. V. 6. P. 132.
5. Semenova L.E., Prokhorov K.A. // Las. Phys. Lett. 2004. V. 1. P. 253.
6. Семенова Л.Е. Гиперкомбинационное рассеяние в полупроводниках A_2B_6 // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 338-339.
7. Gutsche E., Jahne E. // Phys. Stat. Sol. 1967. V. 19. P. 823.

А.Д. БЕЗРУКОВ, К.Н. ОКИШЕВ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ТЕРМОЛИНЗОВЫЙ ОТКЛИК ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ЗЕРКАЛА

Экспериментально исследован термолинзовый отклик термозеркала на основе тонкой полимерной пленки. При облучении гауссовым пучком излучения нагрев пленки приводит к образованию соответствующего рельефа на ее поверхности.

A.D. BEZRUKOV, K.N. OKISHEV

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

THERMAL LENS RESPONSE OF THIN-FILM MIRRORS

The thermal lens response of the mirror is investigated experimentally on the basis of thin polymer film. The heating of the film by the Gaussian beam leads to the formation of appropriate relief on its surface.

Зеркальные пленочные структуры, в которых под действием интенсивного излучения происходит термоиндуцированное рельефообразование, могут быть основой создания микромеханических устройств для защиты оптико-электронных приборов и систем от поражающего лазерного излучения [1-3]. Это делает актуальным исследование светоиндуцированных механизмов модуляции рельефа [4-6].

В данной работе исследован механизм образования рельефа на поверхности полимерной пленки, обусловленный тепловой деформацией пленки при ее нагреве падающим излучением. В экспериментах использовалась полимерная пленка толщиной 80 мкм, с коэффициентом зеркального отражения вблизи нормального угла падения 6 % и коэффициентом пропускания света 0,25 %. В результате воздействия падающего на пленку излучения гелий-неонового лазера (мощность – 60 мВт, длина волны $\lambda = 633$ нм) на поверхности пленки возникла область с выпуклой отражающей поверхностью.

Рассмотрим простейшую модель термозеркала, в которой светоиндуцированное расширение тонкой пленки приводит к соответствующей ее деформации, при этом для малых деформаций можно пренебречь термоупругими напряжениями. Тепловую задачу решаем в предположении, что теплоотвод от поверхности пленки конвективный и

теплопередача вдоль пленки пренебрежимо мала. Тогда задача становится одномерной и легко решается:

$$T(r, t) = T_e + \frac{(1 - R_{\phi}) I_0 e^{-\frac{r^2}{a_0^2}}}{2k} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где k – коэффициент конвективной теплоотдачи; T_e – температура воздуха; R_{ϕ} – коэффициент френелевского отражения; $I_0 e^{-r^2/a_0^2}$ – поперечное распределение интенсивности падающего на пленку гауссова пучка; a_0 – радиус гауссова пучка, $\tau = (c_p \rho d) / 2k$ – время тепловой релаксации.

Высоту деформации пленки в отсутствии термоупругих напряжений можно аппроксимировать следующим выражением:

$$h = a_0 \sqrt{\alpha \Delta T}, \quad (2)$$

где h – высота рельефа; α – коэффициент линейного теплового расширения материала; ΔT – разность температур пленки в поле излучения и начальной. Полученные выражения позволяют рассчитать термолинзовый отклик термозеркала [8].

Рассмотренный механизм образования рельефа перспективен для разработки оптических дефлекторов, нелинейно-оптических преобразователей пространственной структуры излучения [6], а также для применения в оптических методах диагностики материалов [7-9].

Список литературы

1. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм. Владивосток: Дальнаука, 2006.
2. Гуцо Ю.П. Фазовая рельефография. М.: Радио, 1974.
3. Прудников Н.В. и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 76(2). С. 36-41.
4. Брюханова Т.Н. и др. // Фундаментальные исследования. 2015. № 8(2). С. 243-246.
5. Симаков С.Р. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2016. № 8. С. 354-358.
6. Иванов В.И. и др. // Письма в журнал технической физики. 1997. Т. 23(15). С. 60-63.
7. Иванов В.И. и др. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 1. С. 065-068.
8. Сухоруков А.П. // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 5. С. 85-92.
9. Иванов В.И. и др. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 4. С. 39-44.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет***ТОЧНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА ДЛЯ НИЖНИХ
 $^2\Sigma$ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЫ H_2^+**

Численно проанализировано соотношение неопределенности Гейзенберга для трех нижних $^2\Sigma$ электронных состояний H_2^+ от межъядерного расстояния R , используя точные электронные волновые функции. Обнаружено, что для состояний с большей энергией произведение $\Delta r \Delta p$ больше в области $R \leq 6,5$ а.е. Для основного состояния минимум $\Delta r \Delta p$ достигается при $R = 0,935$ а.е. и отличается от предельной величины всего на 9 %.

S.A. ASTASHKEVICH

*Saint-Petersburg State University***EXACT NUMERICAL ANALYSIS OF THE HEISENBERG
UNCERTAINTY RELATION FOR LOWER
 $^2\Sigma$ ELECTRONIC STATES OF THE H_2^+ MOLECULE**

The Heisenberg uncertainty relation for the three lower $^2\Sigma$ electronic states of the H_2^+ molecule from the internuclear distance R is numerically analyzed using exact electronic wave functions. It is found that states with more energy have more value of the product $\Delta r \Delta p$ in the region $R \leq 6,5$ a.e. For the ground state the minimum $\Delta r \Delta p$ is achieved at $R = 0,935$ a.e. and differs from the limit value only by 9 %.

Соотношение неопределенности Гейзенберга является одним из наиболее концептуальных в квантовой механике и играет важную роль в квантовой информатике, метрологии и интерферометрии [1, 2]. Для 3D-случая это соотношение имеет вид (в а.е.) [1]:

$$\Delta r \Delta p \geq 3/2, \quad (1)$$

где Δr и Δp – величины среднеквадратического отклонения координаты и импульса. Равенство в этом выражении достигается для гауссова распределения вероятностей.

Молекула H_2^+ , будучи простейшей двухатомной молекулой, широко используется для проверки различных квантово-механических методов, см. например [3]. В настоящей работе для трех нижних $^2\Sigma$ электронных состояний ($1s\sigma_g$; $2s\sigma_g$ и $2p\sigma_u$) молекулы H_2^+ , потенциальные кривые

которых приведены на рис. 1а, были рассчитаны зависимости от межъядерного расстояния R произведения Δr и Δp (рис. 1б), используя результаты расчета точных волновых функций по методике, описанной в работе [4]. На рис. 1б пунктирной горизонтальной линией отложено предельное значение неравенства (1). Видно, что: 1) для всех исследованных состояний эта зависимость имеет локальный минимум; 2) для основного состояния этот минимум достигается при $R = 0,935$ а.е. и отличается от предельной величины всего на 9 % (т.е. плотность электронного распределения в координатном и импульсном пространствах близки друг к другу и к гауссовскому распределению); 3) для состояний с большей энергией (см. рис. 1а) произведение $\Delta r \Delta p$ больше в области $R \leq 6,5$ а.е. (см. рис. 1б); 4) для состояния $2p\sigma_u$ наблюдается локальный максимум произведения $\Delta r \Delta p$ при $R = 1,107$ а.е.

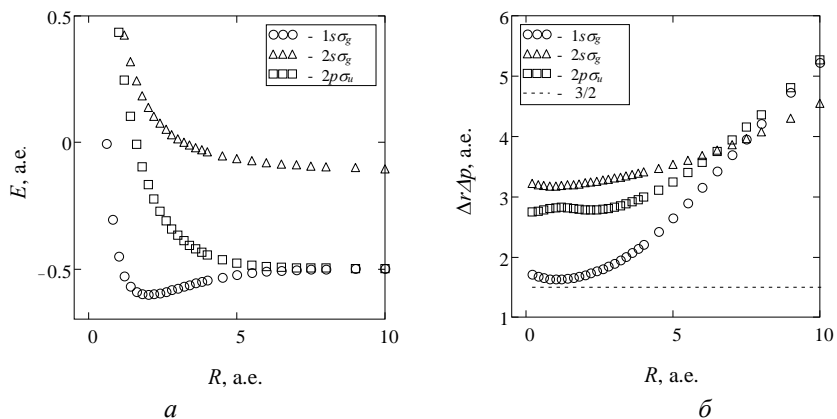


Рис. 1. Потенциальные кривые (а) и рассчитанные зависимости произведения Δr и Δp от межъядерного расстояния R (б) для трех нижних $^2\Sigma$ состояний H_2^+

Полученные результаты представляют интерес для квантовой информатики, а также изучения образования химической связи в молекулах.

Список литературы

1. Statistical Complexity: Applications in Electronic Structure / ed. by K.D. Sen. Berlin: Springer, 2011.
2. Pezzè L., Smerzi A., Oberthaler M.K., et. al. // Rev. Mod. Phys. 2018. V. 90. № 3. P. 035005.
3. Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2018. V. 382. № 28. P. 1881.
4. Astashkevich S.A. // Phys. Lett. A. 2017. V. 381. № 31. P. 2554.

С.Р. СИМАКОВ, Г.Д. ИВАНОВА, О.О. ОВСЕЙЧУК

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СРЕДЕ С РЕЛЬЕФНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

В работе проведен анализ трехволнового смешения излучения для рельефной динамической голограммы на основе термоиндуцированного фазового перехода (плавления) тонкого слоя среды.

S.R. SIMAKOV, G.D. IVANOVA, O.O. OVSEYCHOOK

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

MODELING OF NONLINEAR MULTIWAVE INTERACTIONS IN MEDIUM WITH RELIEF NONLINEARITY

The analysis of three wave mixing for relief dynamic hologram recording based on thermoinduced phase transition (melting) in the thin layer of medium was executed.

В прикладных задачах динамической голографии используются и многочастотные когерентные источники излучения [1]. Особенности записи голограмм такими источниками требуют наличия нерезонансной нелинейности среды [2-4]. К таким нелинейностям относится термоиндуцированный механизм записи рельефных голограмм [5].

В данной работе был проведен численный расчет задачи трехволнового взаимодействия многочастотного излучения в пленке среды, рельеф которой формируется в результате термоиндуцированного фазового перехода [6].

Модель, использованная для численного анализа, включает следующие положения. Многочастотное излучение состоит из девяти монохроматических линий одинаковой интенсивности – данное приближение является упрощенным вариантом реального спектра СО-лазера. В модели принималось, что на плоскую зеркальную поверхность с коэффициентом отражения 100% перпендикулярно падает опорная волна с плоским волновым фронтом. Под углом φ к опорной волне распространяется сигнальная волна. Тепловая задача решалась в одномерном приближении [7].

Результаты численных расчетов приведены на рис. 1.

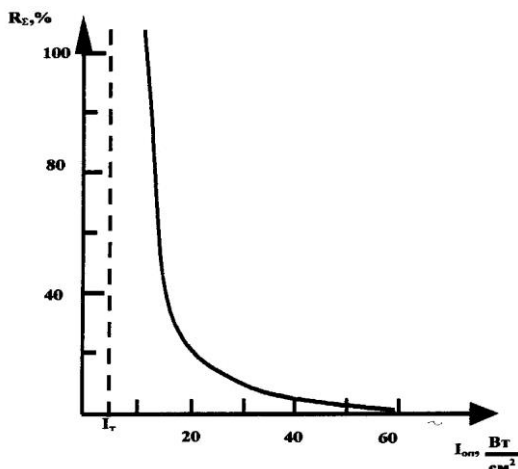


Рис. 1. Зависимость интегрального коэффициента нелинейного отражения от интенсивности опорной волны

Ярко выражена зависимость интегрального коэффициента нелинейного отражения R_{int} от интенсивности опорной волны. График демонстрирует возможность динамического управления эффективностью голограммы путем регулирования теплоотвода [7]. Результаты представляют интерес для прикладной нелинейной оптики и рельефографии [8-10].

Список литературы

1. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм. Владивосток: Дальнаука. 2006.
2. Иванов В.И., Ливашвили А.И. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т. 52. № 12-3. С. 117.
3. Гушо Ю.П. Фазовая рельефография. М.: Радио. 1974.
4. Брюханова Т.Н. и др. // Фундаментальные исследования. 2015. № 8-2. С. 243.
5. Иванов В.И. и др. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. № 1. С. 065-068.
6. Иванов В.И., Илларионов А.И. // Известия высших учебных заведений. Физика. 1997. № 6. С. 69-71.
7. Ivanov V.I., Ivanova G.D. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 735. P. 012037.
8. Симаков С.Р. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2016. № 8. С. 354.
9. Иванов В.И. и др. // Изв. Томского политехнического университета. 2005. Т. 308(5). С.23.
10. Okishev K.N., et. al. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2010. V. 23(3). P. 186.

С.А. АСТАШКЕВИЧ, А.А. МИТЮРЕВА, В.В. СМИРНОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

РАСЧЁТ ВЕРОЯТНОСТИ ФОТОИОНИЗАЦИИ H_2 ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты вычислений сечений фотоионизации молекулы H_2 под действием ультракороткого фотоимпульса в широком диапазоне энергий фотона на основе ранее разработанного квазиклассического траекторного метода.

S.A. ASTASHKEVICH, A.A. MITIUREVA, V.V. SMIRNOV
Saint-Petersburg State University

CALCULATION OF THE PHOTOIONIZATION PROBABILITY OF H_2 UNDER THE ACTION OF ULTRASHORT RADIATION

The results of calculations of photoionization cross sections of the H_2 molecule under the action of an ultrashort photo pulse in a wide range of photon energy based on the previously developed semiclassical trajectory method are presented.

Процесс фотоионизации атомов и молекул имеет большое значение в различных средах и интерес к нему возобновился в связи с разработкой источников ультракороткого сильного поля. Существует несколько теоретических подходов к его рассмотрению. В этом отношении много преимуществ имеет траекторный метод расчёта вероятностей переходов в квантовой системе, развитый в наших работах [1, 2]. Его можно рассматривать как вариант квазиклассического приближения в представлении Вейля. Метод непертурбативен и учитывает все порядки многофотонных и релаксационных процессов. Так же он позволяет учитывать корреляции электронов для многоэлектронных систем. Вероятности фотоионизации могут быть рассчитаны в широком диапазоне частот и интенсивностей поля. Метод позволяет оценить вероятность фотоионизации непосредственно для всего континуума ионизационных уровней без интегрирования по вероятностям для каждого состояния континуума. Вычисление каждого состояния непрерывного спектра (особенно для многоэлектронной системы) может быть довольно сложной задачей. В то же время на практике часто требуется интегральная вероятность ионизации.

Эффективность метода была ранее продемонстрирована на расчетах фотоионизации атомов водорода, гелия и лития [1], а также молекулярного иона водорода [2].

В настоящей заметке представлены результаты вычислений вероятности фотоионизации молекулы водорода. Везде в тексте используется атомная система единиц. Расчеты проводились для длительности импульса $\tau = 30$ (~ 1 fs). Для слабого поля рассчитывалась вероятность однократной и двукратной фотоионизации в зависимости от энергии фотона ω . На рис. 1 приведено сечение полной фотоионизации $\sigma = w/J$, где w – вероятность процесса, J – флюенс фотонов. На рис. 2 приведено отношение сечения двукратной к сечению полной фотоионизации – R . Полученные результаты относятся к равновесному межатомному расстоянию и усреднены по ориентациям оси молекулы к направлению линейно поляризованного излучения. За время длительности импульса межатомное расстояние практически остается неизменным.

Рассчитанные результаты были сопоставлены с рядом других работ. Полученное согласие можно считать удовлетворительным, учитывая простоту методики.

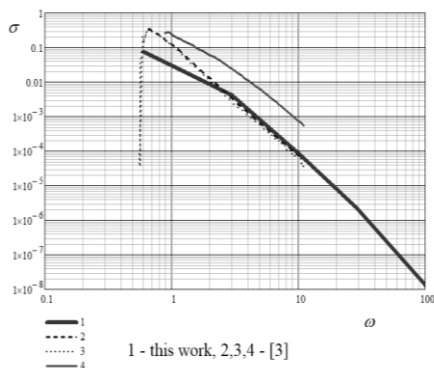


Рис. 1. Сечение полной фотоионизации H_2

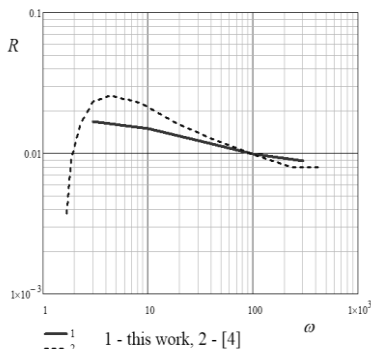


Рис. 2. Отношение сечений двукратной и полной фотоионизации H_2

Список литературы

1. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Rezikyan A.G., Smirnov V.V. // J. Phys. B. 2017. V. 50. № 19. P. 195601.
2. Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2018. V. 382. № 28. P. 1881.
3. Semenov S.K., Cherepkov N.A. // J. Phys. B. 2003. V. 36. № 7. P. 1409.
4. Siedschlag Ch., Pattard T. // J. Phys. B. 2005. V. 38. № 13. P. 2297.

В.Е. ОГЛУЗДИН

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

АКСИОНЫ В ОПТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Приведены результаты экспериментов и предложен их анализ и рассмотрение с помощью модели, учитывающей вклад аксионов в процесс фотолюминесценции, вынужденного электронного комбинационного рассеяния. Определены причины и отмечены обстоятельства, подтверждающие присутствие аксионов в оптических экспериментах.

V.E. OGLUZDIN

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

AXIONS IN OPTICAL EXPERIMENTSES

The report considers two optical processes, each of which satisfies the necessary and sufficient conditions for the existence of axions. In the paper determined conditions and the reasons for the formation of axions. Presents the result of experiments on the formation.

1. Целью работы является экспериментальное исследование условий, обеспечивающих и доказывающих определяющую роль аксионов [1] в процессах взаимодействия оптического излучения: 1) с атомарными парами калия [2] и 2) наноструктурами из атомарного кремния, помещенными в аморфную среду (например, взвесь наночастиц кремния в этиловом спирте). В нашем случае для получения наночастиц кремния был использован лазерный пиролиз силана.

2. Экспериментальная установка включала углекислотный лазер (10 мк), излучение которого направлялось с помощью фокусирующей линзы в реактор, в котором лазерный луч воздействовал на вытекающий из капилляра газ (силан) [3, 4].

3. Использование сферической линзы в качестве фокусирующей системы приводит к образованию в реакторе облака атомарного кремния, частично соединяющиеся, коагулирующего в разноразмерные наночастицы. Помещенные в спирт наночастицы и атомы кремния при облучении аргоновым лазером способны испускать излучение фотолюминесценции. Если сопоставлять спектры фотолюминесценции и спектр поглощения (непропускания), то следует отметить зеркальную

симметрию этих спектров относительно частоты лазера, используемого для возбуждения фотолюминесценции [1].

4. Подобная зеркальная симметрия ранее наблюдалась в парах атомарного калия при их возбуждении с низкочастотной стороны одной из линий главного дублета калия при изучении вынужденного трехфотонного электронного рассеяния [5].

5. В сообщении будет рассмотрен вопрос о поведении пучков лазерного излучения в диспергирующей среде [6], закон сохранения энергии для фотолюминесценции. Обсуждается вопрос о числе фотонов, участвующих в элементарном акте фотолюминесценции, а также рассмотрена роль аксионов в подобных процессах. Наконец, рассмотрена связь наблюдаемых процессов с гипотезой Примакова (Primakoff effect) [7].

Список литературы

1. Оглуздин В.Е. // Инженерная физика. 2015. № 9. С. 16.
2. Оглуздин В.Е. // Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 106.
3. Оглуздин В.Е. // Краткие сообщения по физике. 2003. № 12. С. 3.
4. Оглуздин В.Е. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. С. 418.
5. Аникин В.И., Крючков С.В., Оглуздин В.Е. // Квантовая электроника. 1974. № 9. С. 1923.
6. Оглуздин В.Е. // УФН. 2006. Т. 176. № 4. С. 415.
7. Эффект Примакова. Электронный ресурс https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Примакова.

В.В. ТУРОВЦЕВ^{1,2}, Ю.Д. ОРЛОВ¹, И.А. КАПЛУНОВ¹¹Тверской государственной университет²Тверской государственной медицинской университет**ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕХОДОВ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Найдено аналитическое выражение элементов матрицы оператора дипольного момента при внутреннем вращении в молекулах (крутильных колебаний для связанных состояний). Диагональные элементы матрицы отвечают математическим ожиданиям дипольного момента состояний, а недиагональные – «дипольным моментам переходов». Это позволяет рассчитать интенсивности и другие теоретические параметры колебательного спектра крутильных колебаний.

V.V. TUROVTSEV^{1,2}, Yu.D. ORLOV¹, I.A. KAPLUNOV¹¹Tver state university²Tver state medical university**TRANSITION INTENSITIES OF TORSIONAL VIBRATIONS**

The analytical expression for the dipole moment matrix elements at internal rotation in molecules (torsional vibrations for bound states) is found. The matrix diagonal elements correspond to the expectation of the dipole moment of the states, and the nondiagonal ones correspond to the "transition dipole moments". This allows us to calculate the intensity and all the theoretical parameters of the vibrational spectrum of torsional vibrations

Внутреннее вращение является одним из существенно ангармоничных молекулярных колебаний. Рассмотрение этого движения, как гармонического колебания, приводит к значительным ошибкам при расчетах параметров колебательного спектра вещества. Кроме того, внутреннее вращение приводит к появлению конформационного разнообразия, когда каждому конформеру отвечает своя потенциальная яма на поверхности потенциальной энергии.

Нами [1] было получено решение одномерного торсионного уравнения Шредингера (1) в базисе плоских волн (2)

$$\left[-\frac{\partial}{\partial \varphi} F(\varphi) \frac{\partial}{\partial \varphi} + \hat{V}(\varphi) \right] \Psi(\varphi) = E \Psi(\varphi), \quad (1)$$

$$\Psi_i^*(\varphi) = \sum_m C_m^i e^{-im\varphi}, \quad \text{где} \quad \Psi_i(\varphi) = \sum_m (a_m + ib_m) e^{im\varphi}, \quad (2)$$

когда адиабатический потенциал (потенциальная функция) и структурная функция (зависимость кинематического коэффициента от двугранного угла) представлены тригонометрическими рядами в наиболее общем виде.

Анализ решения позволил найти, исходя из комплекснозначной амплитуды вероятности – волновой функции (2), явное выражение (3) для плотности вероятности $\rho^{(n)}$ [2]

$$\rho^{(n)}(\varphi) = \frac{\sum_l \sum_m [(a_l a_m + b_l b_m) \cos((m-l)\varphi) - (a_l b_m - b_l a_m) \sin((m-l)\varphi)]}{2\pi \sum_m (a_m^2 + b_m^2)}. \quad (3)$$

Уравнение (3) есть основа введения количественной меры для вероятности $p^{(n)}$ (4) нахождения колебательной системы в связанном состоянии в конкретной потенциальной яме

$$p^{(n)} = \int_{\varphi_{l,\max}}^{\varphi_{j,\max}} \rho^{(n)}(\varphi) d\varphi. \quad (4)$$

Физический смысл (4) в том, что $p^{(n)}$ есть мера локализации торсионного состояния в соответствующей потенциальной яме или вес состояния для данного конформера. Опираясь на (4), можно разнести колебательные состояния по всем конформерам с учетом веса этих состояний. Выражения (2) и (3) также позволяют найти интенсивности и все теоретические параметры торсионного (крутильного) спектра, когда оператор дипольного момента представлен тригонометрическим рядом (5)

$$\hat{\mu}(\varphi) = \mu_0 + \sum_i \mu'_i \cos(t\varphi) + \sum_i \mu''_i \sin(t\varphi). \quad (5)$$

В основе процедуры расчета лежит аналитическое выражение, найденное для элементов матрицы дипольного момента с учетом (5) и (2).

В настоящее время мы продолжаем изучать ангармонические молекулярные колебания и повышение прогностической точности решения задачи связываем с решением уравнения (1) в базисе функций Маттье [3, 4].

Список литературы

1. Turovtsev V.V., Belotserkovskii A.V., Orlov Yu.D. // Optics and Spectroscopy. 2014. V. 117. № 5. P. 710.
2. Turovtsev V.V., Orlov M.Yu., Orlov Yu.D. // Optics and Spectroscopy. 2017. V. 123. № 2. P. 217.
3. Belov A.N., Turovtsev V.V., Orlov Yu.D. // Russian Physics Journal. 2017. V. 60. № 6. P. 928.
4. Turovtsev V.V., Orlov Yu.D., Tsirulev A.N. // Optics and Spectroscopy. 2015. V. 119. № 2. P. 191.

А.А. ЗЕМЛЯНОВ^{1,2}, А.В. ТРИФОНОВА¹, Р.В. РЯМБОВ¹
¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ АГЛОМЕРИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ Ag и Al НА ПОРОГИ БЕЗРЕЗОНАТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Приведены результаты измерения спектрально-энергетических характеристик лазерной генерации в тонких слоях растворов родамина 6G с агломерированными наночастицами. Использование в растворах родамина 6G агломератов наночастиц Ag и Al приводит к существенному понижению порогов безрезонаторной лазерной генерации

A.A. ZEMLYANOV^{1,2}, A.V. TRIFONOVA¹, R.V. RYAMBOV¹
¹National Research Tomsk State University
²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

INFLUENCE OF CONCENTRATIONS OF ALGOROMERATED AL AND AG NANOPARTICLES ON THE THRESHOLD OF SECONDARY GENERATION

The results of measuring the spectral-energy characteristics of lasing in thin layers of solutions of rhodamine 6G with agglomerated nanoparticles are presented. The use of agglomerates of Ag and Al nanoparticles in rhodamine 6G solutions leads to a significant decrease in resonator-free lasing thresholds.

В лазерной физике сформировалось и интенсивно развивается новое направление – random lasing. Основные положения random lasing и их многочисленные практические приложения можно найти в обзоре [1]. Физической причиной развития лазерной генерации в рассеивающих средах с лазерно-активными молекулами является формирование положительной обратной связи в таких композитных средах за счет многократного рассеяния фотонов вынужденного излучения в активной среде. Из электродинамики известно, что вблизи поверхности металлических частиц происходит пространственное перераспределение падающего поля, а именно, возникают локальные поля повышенной плотности мощности. При этом увеличивается число возбужденных молекул и за счет эффекта Парселлах [2] увеличивается скорость

спонтанных переходов в молекулах, в результате чего за время действия накачки увеличивается число фотонов вынужденного излучения.

В данной работе приводятся результаты измерения спектральноэнергетических характеристик лазерной генерации в тонких слоях растворов родамина 6G (толщина слоя 20 мкм) с агломерированными наночастицами Al и Ag, Концентрация красителя составляла 10^{-3} моль/л. В эксперименте исследуемые растворы помещались между двумя покровными стеклами и облучались лазерным излучением накачки на длине волны 532 нм. Спектры свечения растворов регистрировались спектрометром AvaSpec-ULS2048L-USB2.

Концентрация частиц в растворе варьировалась от 20 до 0,002 % объемных долей, что соответствует диапазону концентраций от $3 \cdot 10^9$ до 10^6 см $^{-3}$. По спектрам, полученным при различных концентрациях агломератов, построена зависимость пороговой энергии генерации в растворах от концентрации частиц, представленная на рис. 1.

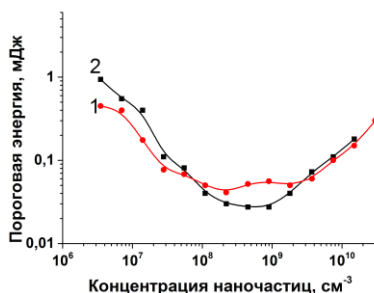


Рис. 1. Зависимость величины пороговой энергии от концентрации агломерированных наночастиц: Ag - кривая 1, Al - кривая 2

Видно, что существует достаточно большая область изменения концентраций агломератов (объемных долей 0,1-1 %), в которой наблюдаются минимальные пороги генерации. Следует отметить, что в пределах этих концентраций частиц пороги генерации уменьшаются в 300 раз по сравнению с порогом генерации в растворе красителя той же толщины 20 мкм без частиц.

Список литературы

1. El-Dardiry Ramy G.S. Sources and gain in photonic random media. FNWI: Van der Waals-Zeeman Institute, 2012.
2. Климов В.В., Дюклуа М., Летохов В.С. Спонтанное излучение атомов в присутствии нанотел // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 7. С. 569-586.

А.П. ТАРАСОВ, Ч.М. БРИСКИНА, В.М. МАРКУШЕВ,
Л.А. ЗАДОРОВИНА¹, А.С. ЛАВРИКОВ¹

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

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

ЛАЗЕРНЫЕ МОДЫ В ТЕТРАПОДАХ ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Анализировались лазерные спектры микротетраподов ZnO, приготовленных методом пиролитического карботермического синтеза. Показано, что лазерные линии формируются в оптических резонаторах различных типов. Предполагено, что низкопороговая генерация обусловлена модами шепчущей галереи.

A.P. TARASOV, Ch.M. BRISKINA, V.M. MARKUSHEV,
L.A. ZADOROZHNYAYA¹, A.S. LAVRIKOV¹

Kotelnikov Institute of Radio-engineering and Electronics of the RAS, Moscow

¹Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre

“Crystallography and Photonics” of the RAS, Moscow

LASING MODES IN ZnO TETRAPODS GROWN BY CARBOTHERMAL SYNTHESIS

Lasing spectra of ZnO microtetrapods produced by pyrolytic carbothermal synthesis have been analyzed. It was shown that observed lasing lines are caused by the action of the optical cavities of different types. Low-threshold lasing was supposed to arise from whispering gallery modes.

В настоящее время ZnO считается наиболее перспективным материалом для изготовления на его основе лазерных устройств, работающих в ближнем УФ диапазоне. Лазерная генерация (ЛГ) на собственных модах кристаллитов может наблюдаться в структурах ZnO с различными морфологиями, среди которых особенное внимание привлекает морфология тетраподов.

В работе анализировались лазерные спектры тетраподов ZnO, зарегистрированные при комнатной температуре. Образцы были изготовлены простым методом пиролитического карботермического синтеза, как описано в [1] (там же приведены предварительные результаты), и демонстрировали низкопороговую ЛГ.

Тетрапод – сложная структура, которая может содержать несколько резонаторов. Поэтому для упрощения задачи изучались спектры

отдельных ног тетраподов. Пример такого спектра приведен на рис. 1в. Здесь (нога N1) лазерные линии соответствуют модам Фабри-Перо (ФП), реализуемым вдоль ноги. Расстояние между линиями $\Delta\lambda_{\text{ФП}} = \lambda^2/[2L(n(\lambda) - \lambda dn/d\lambda)] = 0.44 \text{ нм}$ при $\lambda = 387 \text{ нм}$, длине резонатора $L = 21 \text{ мкм}$ и $dn/d\lambda = -0.015 \text{ нм}^{-1}$ [2] – что отвечает эксперименту. Пороги возбуждения ЛГ на модах такого типа лежали в диапазоне 1-6 мДж/см².

В спектре на рис. 2б (нога N2), можно заметить, как минимум, два набора линий, отличающихся интенсивностями. В этом случае при низкой накачке присутствует только набор линий с большей интенсивностью, что связано с гораздо меньшим порогом возбуждения (~0.6 против ~5.1 мДж/см²). Расстояние между этими линиями больше, чем в случае мод ФП (~0.95 нм). Положения линий соответствуют длинам волн мод и квази мод шепчущей галереи (МШГ и квази-МШГ) одной поляризации при $D \approx 2.3 \text{ мкм}$ (выражения для $\lambda(D)$ приведены, например, в [3]).

Таким образом, низкопороговая лазерная генерация в исследуемых образцах обусловлена, скорее всего, МШГ и квази-МШГ.

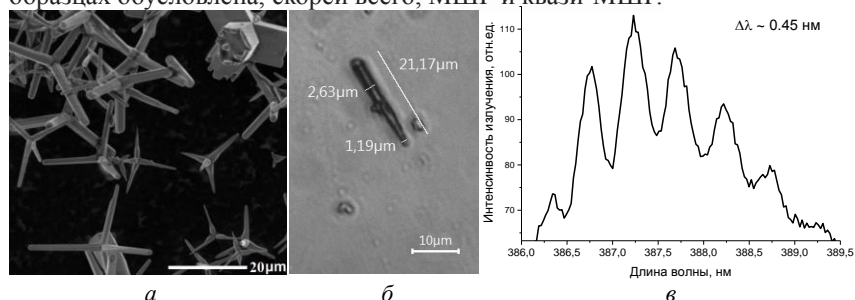


Рис. 1. Тетраподы ZnO (а); нога тетрапода N1 (б); ЛГ-спектр ноги N1 (в)

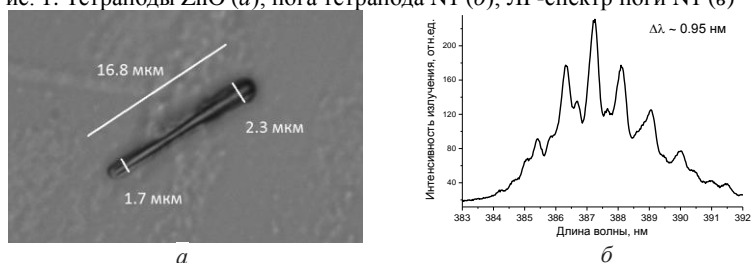


Рис. 2. Нога тетрапода N2 (а); ЛГ-спектр ноги N2 (б)

Список литературы

1. Tarasov A.P., Briskina Ch.M., et. al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1092. P. 012149.
2. Gargas D.J., Toimil-Molares M.E., et. al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 2125.
3. Markushev V.M., Ryzhkov M.V. et al. // J. Rus. Las. Res. 2012. V. 33. P. 122.

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН,
И.А. ЧЕБОТАРЕВ

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

ШИРОКОПОЛОСНАЯ СЕЛЕКЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ НА ВЫСОКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ СО-ЛАЗЕРА С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Проведены эксперименты по широкополосной внутрирезонаторной селекции спектра излучения криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ-возбуждением, работающего в режиме модуляции добротности резонатора. Применение оптического фильтра в качестве одного из зеркал резонатора позволило подавить генерацию излучения с длиной волны ниже 5,6 мкм и сохранить генерацию с длиной волны выше 5,6 мкм.

A.A. IONIN, I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV,
A.Yu. KOZLOV, A.M. SAGITOVA, D.V. SINITSYN,
I.A. CHEBOTAREV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

BROADBAND SELECTION OF LASING ON HIGH VIBRATIONAL TRANSITIONS FOR Q-SWITCHED CO LASER BY AN OPTICAL FILTER

Experiments on the broadband intracavity spectral selection of the cryogenic Q-switched slab RF discharge CO laser emission have been carried out. An application of an optical filter as one of the resonator mirror allowed us to suppress the CO laser generation with wavelength below 5,6 μm and to keep the generation with a wavelength above 5,6 μm .

Лазер на окиси углерода (СО-лазер) может излучать около тысячи спектральных линий в очень широком диапазоне длин волн от 2,5 до 8,7 мкм [1, 2]. СО-лазер может работать в селективном режиме, на одном колебательно-вращательном переходе, и в неселективном режиме с генерацией на множестве колебательно-вращательных переходов [1]. Неселективный СО-лазер с модуляцией добротности резонатора (МДР) способен излучать около 150 спектральных линий одновременно в одном

импульсе в интервале длин волн от 5 до 7,5 мкм [3]. Целью данной работы было широкополосное выделение (селекция) высоких колебательно-вращательных переходов (излучение с длиной волны выше 5,6 мкм) СО-лазера с МДР и подавление генерации на лазерных переходах с длиной волны менее 5,6 мкм.

Исследование проводилось с криогенным неселективным СО-лазером с накачкой активной среды ВЧ-разрядом, работающим в режиме МДР с частотой ~ 100 Гц [4]. Для селекции высоких колебательно-вращательных переходов использовался оптический фильтр, помещенный внутрь резонатора в качестве поворотного зеркала. Спектр пропускания фильтра T представлен пунктирной линией на рис. 1а. Также, на рис. 1а представлен спектр СО-лазера с широкополосной селекцией высоких колебательно-вращательных переходов. На рис. 1б представлен спектр СО-лазера без селекции. На рис. 1 мощности отдельных линий откалиброваны на общую пиковую мощность генерации лазера.

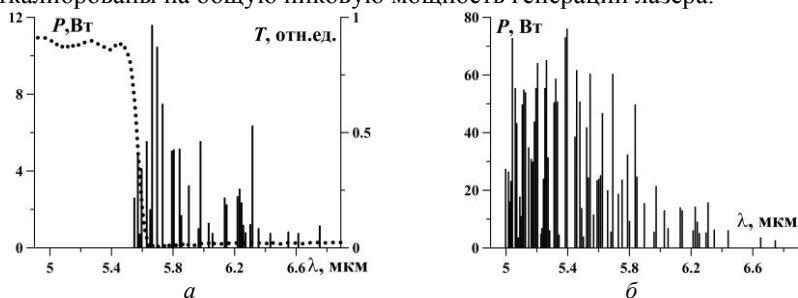


Рис. 1. Спектр СО-лазера с (а) и без (б) широкополосной селекции спектра

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность внутрирезонаторной широкополосной селекции высоких колебательных переходов СО-лазера с МДР с помощью оптического фильтра. Однако в этом случае мощность линий излучения с длиной волны выше 5,6 мкм уменьшалась, возможно, вследствие нарушения каскадного режима работы СО-лазера.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10619).

Список литературы

1. Ionin A.A. Electric Discharge CO Lasers // in Gas Lasers /eds. Masamori E., Walter F. .New York.: Taylor & Francis Group. 2007.
2. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et. al. // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 498.
3. Andreev Yu.M., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., et. al. // Quantum Electron. 2013. V. 43. P. 139.
4. Ionin A.A., Kochetkov Yu.V., Kozlov A.Yu., et. al. // Laser Physics. 2017. V. 14. P. 055001.

К.В. ВЛАСОВА, А.И. МАКАРОВ, Н.Ф. АНДРЕЕВ,
А.Н. КОНОВАЛОВ¹, И.Е. КОЖЕВАТОВ, Д.Е. СИЛИН

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
¹ООО «Кварцевые технологии», Шилово, Рязанская область

СИНТЕТИЧЕСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КВАРЦ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

Приводятся результаты экспериментального исследования величины поглощения и оптической однородности пластин синтетического кристаллического кварца, а также результаты теоретического расчета термооптической постоянной для дисковых конфигураций измеряемых образцов.

K.V. VLASOVA, A.I. MAKAROV, N.F. ANDREEV¹,
A.N. KONOVALOV¹, I.E. KOZHEVATOV, D.E. SILIN

Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod
¹LLC «Quartz technology», Shilovo, Rязan region

SYNTHETIC CRYSTAL QUARTZ AS A MATERIAL FOR OUTPUT STAGES OF HIGH-POWER LASER SYSTEMS

The results of experimental study of the magnitude of absorption and optical homogeneity, as well as theoretical calculations of the thermo-optical constant for disk configurations of the measured samples, are presented.

Развитие технологии гидротермального выращивания искусственного кристаллического кварца (ИКК) сделало возможным уменьшение содержания примесей в выращенных образцах большой апертуры (20x10 см при толщине вдоль оптической оси 2 см и в ближайшей перспективе 30x30x4 см) до 1-3 ppm. Такая концентрация примесей позволяет предположить достаточно малое ($\leq 10^{-6} \text{ см}^{-1}$) поглощение излучения в видимом диапазоне длин волн. Это, а также высокая теплопроводность (в 6 раз выше по сравнению с кварцевым стеклом (КС)) делают данные кристаллы перспективными для изготовления плоских оптических элементов выходных каскадов мощных непрерывных (CW) лазеров.

Измерения проводились с пластиной размером 10x8x1,38 см из ИКК (ООО «Кварцевые технологии») с суммарной концентрацией всех примесей 2-3 ppm. Неоднородность показателя преломления

исследовалась на разработанном и изготовленном в ИПФ РАН интерферометре Физо [1, 2]. Он имел высокую абсолютную точность измерения распределения разности хода, достигнутую в результате калибровки рабочих поверхностей эталонов интерферометра [2], составляющую 0,6 нм, что $\approx 1/1000$ длины волны зондирующего излучения. Измерения показали, что RMS искажения волнового фронта по всей пластине 6,7 нм, а RMS отклонения показателя преломления от среднего $4,9 \cdot 10^{-7}$. Таким образом, среднеквадратичное значение отклонений оптической толщины от идеальной не превышало $\lambda/100$ и, в соответствии с критерием Марешаля, наблюдаемые неоднородности не могут вызвать дополнительных оптических аберраций при использовании тестируемого ИКК в схемах, связанных с построением изображений.

Поглощения измерялось в схеме *Photothermal common-pass interferometry* с временным разрешением, реализованной нами для изотропных образцов [3] с чувствительностью для КС $\leq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$. Как оказалось, переход от измерения поглощения в КС к измерению в ИКК требует увеличения чувствительности схемы в $\sim 3-5$ раз в силу уменьшения термооптического параметра P . Измерения коэффициента поглощения дал значение $(3,5-6) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$. Неопределенность связана с разбросом физических параметров, приводимых в литературе и использованных при вычислении P . Кроме того, показано, что воздействие наведенного стационарного профиля температуры в дисковом оптическом элементе на волновой фронт нагревающего излучения пропорционально его термооптическому параметру, который согласно расчетам, для ИКК меньше в 3-5 раз чем для КС.

Таким образом, проведенное исследование показало, что поглощение выращенных ООО «Кварцевые технологии» ИКК $(3,5-6) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ соответствует лучшим образцам зарубежных КС $(2-8) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$. При этом, заметим, одинаковые мощности CW излучения в одинаковых условиях охлаждения элементов из КС и ИКК, в силу соотношения теплопроводностей, будут приводить к существенному уменьшению (в 3-6 раз) стационарной температуры в ИКК по сравнению с КС. Кроме того, вычисление термооптических констант для дисковых образцов свидетельствует о в 3-5 раз меньшем влиянии наведенного нагревом температурного профиля на волновой фронт греющего излучения в ИКК по сравнению с лучшими образцами «сухих» импортных КС.

Список литературы

1. Силин Д.Е. и др. // Приб. и техн. экспер. 2018. № 3. С. 83.
2. Силин Д.Е. и др. // Приб. и техн. экспер. 2018. № 3. С. 91,
3. Vlasova K.V., et. al. // Appl. Opt. 2018. V. 57. P. 6318.

И.Ю. БЛИНОВ, М.Л. ВОСКАНОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ

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

О ПРОБЛЕМАХ И ПЕРСПЕКТИВАХ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 0,633 мкм С ПОВЫШЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ЧАСТОТЫ

Проведён анализ существующих эталонных He-Ne лазеров с длиной волны 633 нм. Рассмотрены альтернативные возможности реализации оптического стандарта частоты с той же длиной волны, обладающих предпосылками для повышения стабильности частоты при одновременном повышении мощности излучения.

I.Yu. BLINOV, M.L. VOSKANOV, N.P. KHATYREV

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

ABOUT THE PROBLEMS AND PROSPECTIVE OF CREATING STANDARD LASERS WITH A WAVE LENGTH OF 0.633 μm WITH INCREASED FREQUENCY STABILITY

The analysis of the He-Ne lasers based standards with a wavelength of 633 nm was performed. Alternative options are considered for realization of optical frequency standards with this wavelength, which have the potential for frequency stability increase jointly with the radiation power growth.

Развитие науки и техники выдвигает повышенные требования к метрологическому обеспечению измерений времени и частоты в оптическом диапазоне. ФГУП ВНИИФТРИ в 2018 году разработал и ввел в состав Государственного Первичного эталона новый оптический репер на холодных атомах стронция. Создание нового поколения вторичных и рабочих оптических стандартов частоты (ОСЧ) позволяет повысить точность частотных и временных измерений.

Один из наиболее известных ОСЧ основан на гелий-неоновом лазере со стабилизацией частоты по линии поглощения молекул $^{127}\text{I}_2$. Такие ОСЧ давно используются в метрологическом обеспечении измерений длины.

В работе рассмотрены перспективные образцы лазеров, со стабилизацией по поглощающей ячейке низкого давления с газообразным изотопом $^{127}\text{I}_2$. При этом используются сверхтонкие переходы во

вращательных спектрах молекулярного йода [1]. В ОСЧ на основе He-Ne лазера для стабилизации их частоты используется линия R(127)-11-5. Международные сличения таких ОСЧ показывают возможность снижения нестабильности частоты до 3×10^{-12} за время 100 с. Но их средняя мощность обычно не превышает 125 мВт.

В ходе международных сличений [2] показано, что диодный лазер, стабилизированный по частоте линии поглощения молекулярного йода R(60)-8-4 показал нестабильность частоты $\approx 2 \times 10^{-13}$ за 100 с. Это лучше чем He-Ne аналоги. Указанная линия R(60)-8-4 отстоит на ~ 12 ГГц от линии R(127)-11-5. Точный сдвиг частоты на такую величину затруднителен. Но возможно использование других линий. Например, R(33)-6-3, которая находится на ~ 1 ГГц от линии R(127)-11-5.

В работе [3] реализован ОСЧ, на Nd:YAG-лазере с длиной волны второй гармоники 532 нм. Излучение стабилизировано по линии поглощения R(56)-32-0. Нестабильность частоты достигает значений 1×10^{-14} за время 200 с. Поскольку существуют возможности создания волоконных лазеров с длиной волны 1266 нм [4], то использование метода удвоения частоты позволяет работать с линией поглощения R(127)-11-5. Среди способов построения волоконных лазеров обращают на себя внимание схемы с кольцевыми резонаторами [5], которые обеспечивают получение линий генерации порядка 20 кГц, что может упростить задачу повышения стабильности частоты лазера.

Рассмотренные варианты создания ОСЧ на длине волны 633 нм позволяют рассчитывать на повышение стабильности частоты на порядок, а уровня мощности выходного излучения, по крайней мере, до 15 мВт.

Для успешной реализации необходимы исследования систем стабилизации частоты излучения, по линии поглощения R(127)-11-5. Также нужно исследовать методы изменения частоты лазерного излучения стабилизированной по альтернативным линиям поглощения молекулы $^{127}\text{I}_2$ и её приведения к значению, соответствующему линии R(127)-11-5 с помощью частотно-сдвигающих элементов.

Список литературы

1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
2. Zarka A., et. al. // Metrologia. 2000. V. 37. P. 329-339.
3. Скворцов М.Н., Охапкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 12. С. 1101-1106.
4. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 7. С. 615-617.
5. Колегов А.А., Софиенко Г.С., Минашина Л.А., Бочков А.В. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 1. С. 13-16.

А.В. ФЕДИН

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

СТАБИЛИЗАЦИЯ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО Nd:YAG-ЛАЗЕРА С МНОГОПЕТЛЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Предложен и исследован способ стабилизации частоты и сужения ширины полосы генерации твердотельного импульсного Nd:YAG-лазера с многопетлевым резонатором путем введения внутрирезонаторной стационарной объемной брэгговской решетки. Это позволяет зафиксировать частоту и уменьшить ширину спектральной линии генерации с 18 до 4 пм.

A.V. FEDIN

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

STABILIZATION OF THE GENERATING SPECTRUM OF A SOLID-STATE PULSED Nd:YAG-LASER WITH A MULTY-LOOP CAVITY

A method for stabilizing the frequency and reducing the bandwidth of the generation of a solid-state Nd:YAG pulsed laser with a multi-loop cavity is proposed and investigated by introducing an intracavity stationary bulk Bragg grating. This allows us to fix the frequency and reduce the width of the spectral line of generation from 18 to 4 pm.

Применение методов самообращения волнового фронта (самоОВФ) позволяет создавать компактные лазерные системы с большой энергией (около 0,5 Дж), пиковой мощностью (до 20 МВт) и высоким оптическим качеством импульса модулированного излучения ($M^2 < 1,2$). При этом, в отдельных случаях удается получать одночастотные импульсы генерации с шириной полосы около 1 пм (~ 300 МГц).

Однако при больших превышениях над порогом частота генерации произвольным образом изменяется от импульса к импульсу в пределах центральной части полосы усиления активной среды. Такая нестабильность существенно ограничивает применение данного лазера.

Для решения задачи применили комплексный стационарно-динамический голографический способ, в котором для формирования динамических решеток коэффициента усиления мы вводили дополнительный селектирующий элемент – стационарную объемную

брэгговскую решетку. Была использована пропускающая решетка 11 (рис. 1) толщиной 1 мм. Угол дифракции был выбран 27.1° . Дифракционная эффективность записанной решетки составила 75 %.

В лазерной системе генерация начинается с шумового излучения в активном элементе. По мере развития генерации внутрирезонаторными пересекающимися пучками в активном элементе записываются пропускающие решетки коэффициента усиления и решетки показателя преломления в ПЛЗ, образующие самоподстраивающийся адаптивный резонатор лазера. На образовавшихся решетках происходит перераспределение поля излучения и обращение его волнового фронта. При установке стационарной объемной брэгговской решетки, она выделяет центральные компоненты контура усиления уже на стадии шумового излучения, что приводит к стабилизации частоты генерации лазера. Записанные в активной среде динамические решетки совместно со стационарной брэгговской производят селекцию пространственных, спектральных и поляризационных компонент излучения. ПЛЗ реализует режим пассивной модуляции добротности и позволяет получить излучение в виде цуга импульсов наносекундной длительности.

На рис. 2 представлены интерферограммы, полученные в режиме генерации цуга из 11 импульсов, без брэгговской решетки (а) и после ее установки (б). Видно, что суммарная спектральная ширина без брэгговской решетки составила 18 пм, а при использовании решетки – не превышала 4 пм. При этом центральная частота излучения оставалась постоянной.

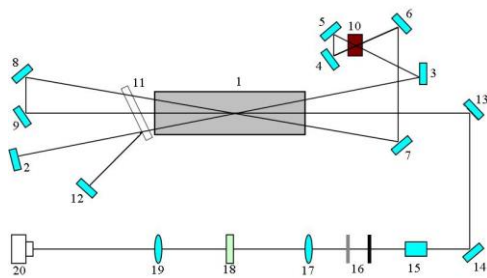


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 - активный элемент, 2-9, 12-14 - зеркала,
 10 - пассивный затвор LiF:F_2^- , 11 - брэгговская
 решетка, 15 - кристалл для получения второй
 гармоники, 16 - фильтры, 17, 19 - линзы,
 18 - эталон Фабри-Перо, 20 - ПЗС-матрица

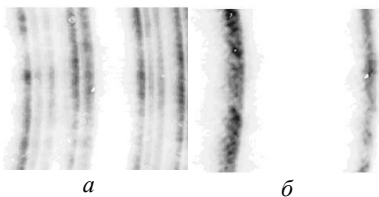


Рис. 2. Спектры лазера
 в режиме генерации цуга
 импульсов в отсутствие
 брэгговской решетки (а)
 и при использовании в схеме
 брэгговской решетки (б)

М.Г. ГАЛУШКИН, Р.В. ГРИШАЕВ

*Институт проблем лазерных и информационных технологий –
филиал ФНИИ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХПРОХОДНЫХ ПЛАНАРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА YAG:Yb⁺³ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Разработана расчетная модель двухпроходного планарного усилителя мощности для непрерывного лазерного излучения и для фемтосекундных лазерных импульсов. Показано, что в двухпроходном усилителе мощности насыщение поглощения излучения накачки ослабляется с ростом интенсивности излучения на входе усилителя.

M.G. GALUSHKIN, R.V. GRISHAEV

*Institute on Laser and Information Technologies –
branch of FSRC «Crystallography and photonics» of the RAS, Shatura*

ENERGY PARAMETERS OF DOUBLE-PASS PLANAR AMPLIFIERS BASED ON DIODE-PUMPED YAG:Yb⁺³

The numerical model of the double-pass planar amplifier of continuous laser radiation and femtosecond laser pulses has been developed. It has been shown that in the double-pass scheme of the power amplifier the saturation of pump radiation absorption decays owing to an increase in radiation intensity at the input of the amplifier.

Для усиления лазерного излучения с длиной волны 1 мкм перспективными являются планарные активные элементы на YAG:Yb⁺³. Практически важным способом повышения энергетической эффективности таких усилителей является применение двухпроходной схемы усиления, когда усиливаемый пучок дважды проходит через активный элемент. Такая двухпроходная схема реализуется также в усилителях с ОВФ-зеркалом.

В этой связи актуальной представляется разработка расчётно-теоретической модели двухпроходных планарных YAG:Yb⁺³ усилителей мощности для непрерывного лазерного излучения и для фемтосекундных импульсов.

Энергетические параметры двухпроходного усилителя мощности описываются уравнениями для интенсивностей J^+ , J^- двух встречных волн [1]:

$$\frac{dJ^+}{dZ} = \frac{\alpha_0 J^+}{1 + (J^+ + J^-)/J_s}, \quad -\frac{dJ^-}{dZ} = \frac{\alpha_0 J^-}{1 + (J^+ + J^-)/J_s}, \quad (1)$$

где α_0 – коэффициент усиления слабого сигнала, J_s – интенсивность насыщения. Решение этих уравнений должно удовлетворять граничным условиям: $J^+(0) = J_0^+$, $J^-(L_a) = RJ^+(L_a)$, где L_a – длина активной области, R – коэффициент отражения поворотного зеркала. Из уравнений (1) выводятся равенства:

$$J^+(Z)J^-(Z) = const = J_0^+J^-(0) = J^+(L_a)J^-(L_a) = R(J^+(L_a))^2, \quad (2)$$

где $J^-(0)$ – интенсивность выходного излучения. В случае, когда $\alpha_0 = const$, из (2) и (1) выводится трансцендентное уравнение для выходной интенсивности $J^-(0)$. Однако в твердотельных планарных усилителях проявляется эффект насыщения поглощения накачки, вследствие чего α_0 в (1) зависит от суммарной интенсивности встречных волн.

Была разработана программа численного расчёта уравнений (1), (2), и получены энергетические характеристики планарного усилителя мощности на YAG:Yb⁺³ с учётом насыщения поглощения излучения накачки. Найденные решения показывают, что в двухпроходной схеме эффект насыщения накачки проявляется слабее при более высокой интенсивности излучения на входе усилителя.

Расчет энергетических параметров двухпроходного планарного усилителя фемтосекундных импульсов проводился с учётом насыщения накачки и основных особенностей усиления коротких импульсов, используя результаты работы [2].

Проведённые расчётно-теоретических исследования показали, что двухпроходная схема усиления в сравнении с однопроходной позволяет существенно повысить энергоёмкость в планарных YAG:Yb⁺³ усилителях мощности для непрерывного лазерного излучения и для фемтосекундных импульсов.

Список литературы

1. Galushkin M.G., Yakunin V.P., Dyachkov R.G. // Laser Physycs. 2017. V. 27. P. 015001.
2. Galushkin M.G., Grishaev R.V. // Laser Physics. 2017. V. 27. P. 125003.

В.А. КОЖЕВНИКОВ, В.Е. ПРИВАЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЕЧЕНИЯ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛАЗЕРА НА УСИЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Уточнена методика расчета коэффициента усиления излучения лазера для различных поперечных сечений активного элемента. Она проверена для моделей, допускающих аналитическое решение. В поисках увеличения усиления рассматривались нетрадиционные сечения, для них получены новые результаты.

V.A. KOZHEVNIKOV, V.E. PRIVALOV

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnic University

THE GEOMETRICAL EFFECT OF AN ACTIVE ELEMENT CROSS-SECTION ON THE LASER GAIN

A method for calculating the dependence of a laser emission gain on the tube cross-section's geometry has been developed. The method was tested for some cross-sectional forms that allowed independent theoretical calculation. In search of increasing gains, nontraditional sections were considered, new results were obtained for them.

Несмотря на то, что лазеры традиционно имели цилиндрическую форму, с самого начала использования лазеров стали проводиться исследования по нахождению резервов мощности лазеров при использовании других форм. Возник вопрос о нахождении оптимального с энергетической точки зрения сечения активного элемента. Хотя использовавшиеся тогда модели не были достаточно строгими, эксперименты с He-Ne лазером прямоугольного сечения показали хорошее соответствие модели и реальности. Помимо прямоугольного исследовались различные сечения, но так как большинство рассмотренных сечений не допускали аналитических решений, то использовались приближенные вычисления. Поскольку за это время вычислительные возможности существенно выросли, возникло естественное желание пересмотреть старые методы и модели с целью их уточнения. В ходе пересмотра выяснилось, что в тех моделях использовались вычислительно неустойчивые алгоритмы, что привело к неправильным расчетам.

Поэтому был предложен новый метод расчета коэффициента усиления излучения лазера при произвольном поперечном сечении активного элемента [1]. Этот метод является быстрым и вычислительно устойчивым и был проверен на моделях, допускающих аналитическое решение. Результаты расчетов совпали с величинами, найденными аналитически.

В поисках сечения, дающего увеличение усиления лазера, исследовались различные сложные сечения, как рассмотренные ранее, так и новые [2, 3], при этом для старых сечений появились новые результаты. Достоинством нового метода оказалась его непротиворечивость. В настоящее время выясняется роль неоднородных граничных условий. В дальнейшем мы планируем усложнить рассматриваемую модель с учетом распределения интенсивности поля в резонаторе и применить предложенный метод для расчета при других сечениях трубки и граничных условиях с целью найти оптимальное сечение.

Список литературы

1. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // Научно-технические ведомости СПбПУ Петра Великого. Физ.-мат. серия. 2018. Т. 11. № 2. С. 84.
2. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // Известия ВУЗов. Физика. 2018. Т. 61. № 5. С. 94.
3. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // Известия ВУЗов. Физика. 2018. Т. 61. № 10. С. 102.

Х. БАЗЗАЛ, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН,
В.В. ЛЫЧКОВСКИЙ

Белорусский государственный университет, Минск

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖИМПУЛЬСНОГО
ИНТЕРВАЛА НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ AlN
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЕВУЮ МИШЕНЬ
СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Изучено влияние энергии и межимпульсного интервала на процесс образования AlN в лазерной плазме при воздействии мощных одиночных и сдвоенных лазерных импульсов ($\approx 10^9$ - $5 \cdot 10^{10}$ Вт·см⁻²) на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показано, что при увеличении энергии и межимпульсного интервала от 0 до 50 мкс максимальная скорость образования AlN изменяется в интервале от 5 до 12 мкс.

Kh. BAZZAL, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN,
V.V. LICHKOVSKIY

Belarusian State University, Minsk

**STUDY OF THE INFLUENCE OF INTER-PULSE INTERVAL
ON THE PROCESSES OF FORMATION OF AlN
WHEN EXPOSED TO ALUMINUM TARGET
BY DOUBLE LASER PULSES**

The effect of the energy and interpulse time on the processes of AlN formation in the laser plasma due to the effect of high-power single and double laser pulses ($\approx 10^9$ - $5 \cdot 10^{10}$ W·cm⁻²) on the surface of the aluminum-alloy target in the air has been studied experimentally. It has been shown that, with an increase in the energy and of the interpulse time from 0 to 50 μ s, a maximal rate of the AlN formation is varying over the interval 5-12 μ s.

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.

Динамику развития пробоя отверстий и образования AlN исследовали в атмосфере воздуха при воздействии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на пластинку из алюминиевого сплава Д16Т (толщина 1 мм) в

зависимости от энергии (10-60 мДж) и временного интервала между сдвоенными импульсами. Размер точки фокусировки ≈ 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм.

Количество импульсов, достигающих пробоя отверстия, позволяет определить среднюю линейную скорость абляции для анализируемого образца. Средние линейные скорости абляции для задержек в интервале 0-15 мкс представлены на рис. 1. Отметим, что при нулевой задержке между импульсами и энергии импульсов излучения более 30 мДж необходимое количество импульсов для пробоя образца превышает несколько тысяч.

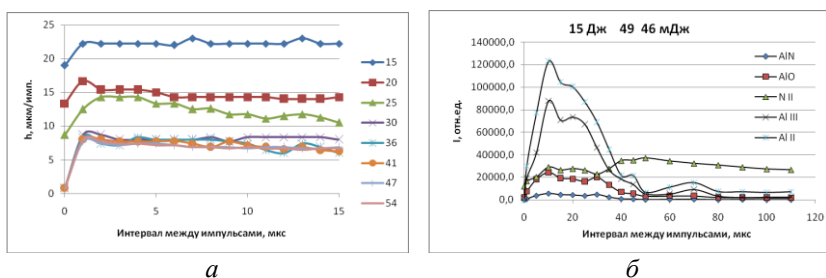


Рис. 1. Зависимость средней линейной скорости абляции (h) образца дюралюминия Д16Т (*а*); интенсивности линий от интервала между первым и вторым импульсом (*б*)

Наличие резкого временного изменения скорости абляции указывает, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала. При многоимпульсном воздействии в силу накопления аблированных частиц в канале величина экранировки зависит от частоты следования и энергии предшествующих лазерных импульсов. 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 может служить аналогом сопла, проходя через которое, вещество мишени будет более эффективно кластеризоваться. Из анализа графиков на рис. 1б видно, что при увеличении энергии и межимпульсного интервала от 0 до 50 мкс максимальная скорость образования AlN изменяется в интервале от 5 до 12 мкс.

К.З. НГУЕН, Е.А. ШАХНО, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ,
Д.А. СИНЁВ, В.К. ЛЬОНГ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ТИТАНА ПРИ ПИКОСЕКУНДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе приведены фотографии пробных записанных структур и результаты расчетов распределения толщины оксидного слоя на поверхности пленки, а также определено оптимальное количество импульсов (в частности 7000-9000 импульсов при энергии одного импульса 8 мкДж для плёнок титана толщиной 20 нм) для получения наилучшего контраста и резкости края записываемых элементов с учетом изменения оптической характеристики пленки в процессе экспозиции.

Q.D. NGUYEN, E.A. SHAKHNO, R.A. ZAKOLDAEV,
D.A. SINEV, V.C. LUONG
ITMO University, Saint-Petersburg

FEATURES OF INTERFERENCE THERMOCHEMICAL RECORDING ON THIN TITANIUM FILMS UNDER THE INFLUENCE OF PICOSECOND LASER

In the work, photos of test recorded structures and the results of calculating the thickness distribution of the oxide layer on the surface of the film are presented, and the optimum number of pulses (in particular 7000-9000 pulses at the energy of one pulse of 8 μ J, thickness of the titanium film – 20 nm) is determined to obtain the best contrast and sharpness of the edges of the recorded elements, considering the change in the optical characteristic of the film during exposure.

Лазерная термохимическая запись на тонких металлических плёнках в настоящее время играет важную роль для формирования топологических структур с высоким разрешением. Пленочные структуры широко применяются в самых различных областях, одной из них является создание дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. В последние годы возникли новые идеи об одноэтапной обработке без следующей операции травления при использовании тонких пленок титана, образующих прозрачные оксидные слои [2]. Таким образом, становится возможной прямая, одноступенчатая лазерная запись, т.е. можно получить топологические структуры сразу после экспозиции. Для повышения

контраста и качества записи необходимо формировать распределение интенсивности излучения на поверхности с субмикронными размерами элементов, при этом предлагается также использовать короткие (пикосекундные) импульсы воздействующего излучения, аналогичные методы были проведены для тонких плёнок хрома [3, 4].

Целью работы является теоретическое моделирование окисления на плёнках титана для успешного планирования лазерной записи в интерференционном поле и определения её потенциальных возможностей (рис. 1). Сильная нелинейная зависимость толщины оксидного слоя от температуры поверхности и отрицательная обратная связь между оптическими свойствами и образуемой толщиной оксида были учтены. Результаты расчетов (рис. 2) показали, что ширина записанных линий 0,22 мкм (этот размер меньше дифракционного предела $\lambda/2$ для рабочей длины волны 532 нм) с разрешением 650 мм^{-1} при облучении 1000 или более импульсов, и возможно увеличить разрешение при использовании более тонких плёнок и при записи в ультрафиолетовом диапазоне (1300 мм^{-1} для длины волны 266 нм).

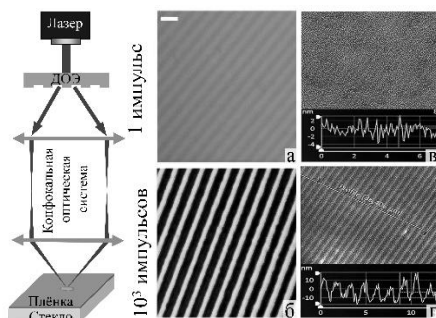


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, микрофотографии и профилометрии периодических структур после действия 1 импульса (а, в) и 1000 импульсов (б, г)

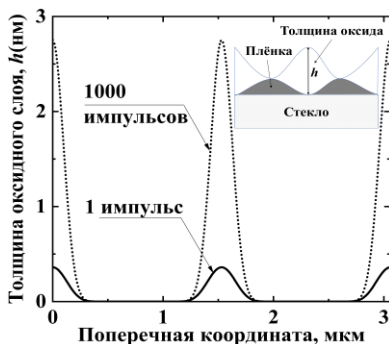


Рис. 2. Расчетный результат толщины оксидного слоя после действия 1 импульса и 1000 импульсов

Список литературы

1. Вейко В.П. и др. // Автметрия. 2017. Т. 53 (5). С. 66.
2. Шахно Е.А. и др. // Оптический журнал. 2014. Т. 81(5). С. 93-98.
3. Veiko V.P., et. al. // Applied Surface Science. 2017. V. 404. P. 63-66.
4. Gedvilas M., et. al. // Thin Solid Films. 2017. V. 634. P. 134-140.

А.П. МЕЛЕХОВ, Е.Д. ВОВЧЕНКО, В.М. КОМАРЕЦКИЙ,
Р.Ш. РАМАКОТИ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

Применение высокоскоростной стрик-камеры для изучения процессов, происходящих при развитии лазерноиницированного вакуумного разряда. Формирование разряда может сопровождаться генерацией терагерцового излучения. Запасенная энергия разряда $E_D \approx 17$ Дж.

A.P. MELEKHOV, E.D. VOVCHENKO, V.M. KOMARESKY,
R.S. RAMAKOTI

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

HIGH-SPEED OPTICAL REGISTRATION OF THE FORMATION OF RADIATING TERAHERTZ VACUUM SPARK

The use of high-speed streak camera to study the processes occurring during the development of a laser-initiated vacuum discharge. The formation of a discharge may be accompanied by the generation of terahertz radiation. The stored energy of the discharge $E_D \approx 17$ J.

Одним, из возможных, источником широкополосного ТГц-излучения (ТИ) может служить вакуумная искра с лазерным инициированием. Предполагаются несколько механизмов генерации ТГц излучения из вакуумной искры, отличающихся природой возникновения: тепловое излучение, тормозное излучение электронов в поле ионов и излучение, испускаемое за счет неустойчивостей (колебаний), генерируемых в периодической структуре микропинча электронными пучками. Примерный спектр ТГц-излучения такой системы показан в работе [1].

Цель настоящей работы состояла в изучении оптическими методами процесса формирования плазменного образования вакуумной искры и сопоставления с мощностью генерируемого плазмой терагерцового излучения (ТИ).

На рис. 1 показан вид экспериментальной установки с системой высокоскоростной фоторегистрации на основе стрик-камеры БИФО К008.

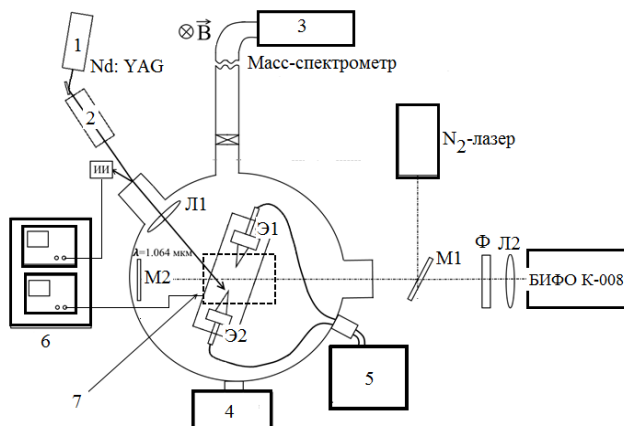


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 - лазер; 2 - лазерный усилитель; 3 - масс-спектрометр; 4 - вакуумная откачка; 5 - высоковольтная система; 6 - цифровые осциллографы; М1 - полупрозрачное зеркало; М2 - глухое зеркало; Ф - фильтр; Л1, Л2 - фокусирующие линзы; Э1, Э2 - электроды; ИИ - измеритель интенсивности лазерного излучения

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. ТИ выводится из вакуумной камеры через 3 мм кварцевое окно и детектируется пироэлектрическим приемником.

Эксперименты с регистрацией масс-спектров ионов разрядной плазмы показали, что мощность генерируемого ТИ нелинейно зависит от концентрации электронов в плазме разряда $P \sim N_e^x$, где P – мощность (энергия) ТИ; N_e – концентрация электронов в плазме; $x = 1,5-2$. На основании анализа литературных источников предполагается, что концентрация электронов в плазме может составлять $N_e = 10^{14} \div 10^{15}$ см⁻³.

Для понимания природы генерации ТИ плазмой вакуумной искры будет проведена серия экспериментов с применением стрик-камеры и параллельной регистрацией мощности ТИ.

Список литературы

1. Kozlovskii K.I., et. al. Terahertz Radiation of a Low-inductance Discharge in Vacuum with Laser-plasma Initiation // VII International Conference on Photonics and Information Optics. 2018.

Я.В. ГЕТМАНОВ¹, В.Л. ДОРОХОВ¹, А.И. ЗАРОВСКИЙ,
А.С. КОМЕЛЬКОВ, Г.Я. КУРКИН¹, В.И. ПЕЛИПЕНКО

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

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

ПИКОСЕКУНДНЫЙ ДИССЕКТОР СО СКРЕЩЕННОЙ РАЗВЕРТКОЙ

В работе сообщается о разработке и создании двухщелевого электронно-оптического диссектора с пикосекундным временным разрешением, работающего в режиме скрещенной развертки.

Ya. V. GETMANOV¹, V.L. DOROKHOV¹, A.I. ZAROVSKY,
A.S. KOMELKOV, G.Ya. KURKIN¹, V.I. PELIPENKO

Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow

¹Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk

PICOSECOND DISSECTOR WITH CROSSED SWEEP

In this paper, we report on the development and manufacture of a dual-slit electron-optical dissector with a picosecond time resolution operating in the crossed-sweep mode.

Диссектор предназначен для работы с источниками синхротронного излучения и электрон-позитронными коллайдерами, когда необходимо одновременно регистрировать временные профили электронных и позитронных пучков, заполняющих от двух до нескольких сотен соседних сепаратрис ускорительного кольца.

Принципиальной особенностью существующей конструкции диссектора [1], используемого в ускорителях, является то, что в плоскости щели происходит наложение друг на друга разверток банчей из разных сепаратрис ускорителя. Это затрудняет измерение продольного (временного) профиля у одного выделенного банча в пучке. Для решения этой проблемы нами разработана конструкция двухщелевого диссектора со скрещенной разверткой на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП) модели ПИФ-01 [2].

Новый диссектор имеет две сканирующие щели, которые разделены как по вертикали, так и по горизонтали. Для получения режима скрещенной развертки высокочастотные синусоидальные напряжения с кратными частотами (десятки МГц) подаются на две пары отклоняющих

пластин (пластины развертки и затвора) ЭОП, расположенных перпендикулярно друг к другу и, таким образом, при регистрации последовательности периодических световых импульсов происходит пространственное разделение сигналов по двум щелям на выходе преобразователя. Сканирование развернутого электронного изображения осуществляется посредством линейной фазовой модуляции высокочастотного напряжения развертки с частотой 50 Гц. Такое разделение импульсов позволит регистрировать профили банчей из двух соседних сепаратрис ускорителя, которые налагаются друг на друга в отсутствие скрещенной развертки.

Динамические испытания и измерение временного разрешения разработанного диссектора проводились на лазерной установке. Титан-сапфировый лазер генерировал световые импульсы на длине волны 0,8 мкм длительностью 30 фс с частотой повторения 75,3 МГц, равной частоте ВЧ-напряжения, подаваемого на пару пластин развертки. На вторую пару перпендикулярных пластин подается напряжение вдвое меньшей частоты. Проведенные предварительные расчеты показали, что при правильном расположении щелей, соответствующем параметрам приложенных к пластинам напряжений, произойдет выборка лазерных импульсов. Условно называемые четные импульсы пройдут через одну щель, а нечетные – через вторую. В результате на выходе диссектора мы имеем два цуга световых импульсов, «сдвинутых» друг относительно друга на время, зависящее от скорости развертки и расстояния между щелями в направлении развертки. Такой же принцип работы диссектора может быть использован и для регистрации продольных профилей банчей в пучке ускорителя.

В результате проведенных расчетов и динамических испытаний разработанного диссектора, выполненных на лазерной установке, было зарегистрировано с временным разрешением $6 \pm 0,5$ пс два цуга световых импульсов, «сдвинутых» во времени друг относительно друга.

Список литературы

1. Zinin E.I. Stroboscopic method of electro-optical picosecond-resolution chronography and its application in synchrotron radiation experiments // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1983.
2. Degtyareva V.P., Kulikov Yu.V., Monastyrskiy M.A., et al. // Proc. SPIE. 1984. V. 491. P. 239.

А.В. НЕУПОКОЕВА, С.А. НЕБОГИН¹

Иркутский государственный медицинский университет

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛОГРАММ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Рассматривается изменение структуры раствора инсулина под действием лазерного излучения. Контроль за структурными изменениями проводится путем анализа кристаллограмм с помощью зондового микроскопа с нанометровым разрешением.

A.V. NEUPOKOEVA, S.A. NEBOGIN¹

Irkutsk State Medical University

¹*Irkutsk National Research Technical University*

PROBE MICROSCOPY OF CRYSTALLOGRAM UNDER LASER MODIFICATION OF ORGANIC SOLUTIONS

The insulin solution structure changing under the laser radiation action is considered. Structural changes are monitored by analyzing crystallograms using a probe microscope with nanometer resolution.

Известно, что лазерное излучение применяется не только в терапии различных заболеваний [1], но и для увеличения эффективности лекарственных средств [2, 3]. В работе [4] показано, что под действием лазерного излучения структура белковых растворов изменяется, что может быть зарегистрировано с помощью кристаллографического метода [5]. Инсулин также является веществом белковой природы, поэтому целью данной работы является исследовать возможность влиять на структуру раствора инсулина путем воздействия лазерным излучением.

В качестве объекта исследования был выбран раствор человеческого инсулина в виде препарата «актропид» в ампулах. Раствор инсулина облучали лазерным излучением с длиной волны 655 нм и интенсивностью около 150 мВт/см². Время облучения составляло 2, 5, 10 и 15 минут. До облучения на стеклянную пластину поливался контрольный (необлученный) образец. Все образцы выдерживались при комнатной температуре для получения кристаллограмм, которые затем

исследовались в сканирующем зондовом микроскопе NT-MDTsolver путем построения 3D-модель рельефа кристаллограммы (рис. 1).

Анализ 3D-моделей показал, что с увеличением времени лазерного воздействия значительно уменьшается количество пиков на кристаллограмме, увеличивается гладкость слоя и вместе с тем уменьшается и средняя высота пика. Так, до воздействия средняя высота пика составляет 50-60 нм, а максимальная – около 80 нм, частота пиков – 60-80 на 100 мкм². Через 15 минут воздействия снижается как средняя высота пика – до 30 нм, так и их частота – до 3-4 на 100 мкм².

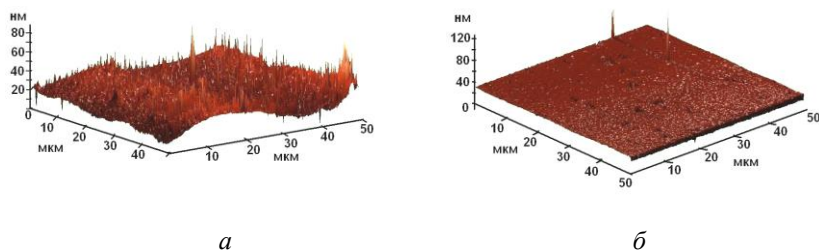


Рис. 1. 3D-модель рельефа кристаллограммы раствора инсулина: до воздействия (контроль) (а); после 15 минут воздействия (б)

Нами экспериментально показана возможность влиять на структуру раствора инсулина путем облучения лазерным излучением с длиной волны 655 нм. Анализ кристаллограмм инсулина с помощью зондового микроскопа позволил выявить значительное увеличение гладкости поверхности, что, по нашему мнению, связано с измельчением макромолекулярных кластеров в растворе в процессе облучения.

Список литературы

1. Лазерная терапия и профилактика /под ред. А.В. Картелишева и др. М.: Практическая медицина, 2012.
2. Тифлова О.А., Дмитриев А.К., Картунов В.Н. Лазерная термо- фотомодификация глибинсодержащих патологических тканей // В сб. Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии. Материалы Международной конференции под ред. Е.И. Глориозова. 2016. С. 207-211.
3. Neupokoeva A.V., Kokorina L.A., Simonova E.V., Malov A.N. Laser activation of a nutrient medium and antibiotic solutions and its estimation by of bacteria growth dynamics Proceedings of SPIE. 2017. V. 10176. P. 101760D.
4. Malov A.N., Seteikin A.Yu., Neupokoeva A.V. et al. The laser radiation action on the biological objects // Optik. 2013. V.124. P. 6034-6041.
5. Paringer R.A., Kupriyanov A.V., Piyasova N.Y. Dendritic crystallogram images classification // Journal of Biomedical Photonics and Engineering. 2015. № 2. P. 135-138.

В.Е. РОГАЛИН, М.И. КРЫМСКИЙ¹, С.С. КОЛЧИН²,
С.М. АРАНЧИЙ³, И.А. КАПЛУНОВ

Тверской государственной университет

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

²*НПК «Системы прецизионного приборостроения», Москва*

³*ООО «МЭВ-технологии», Москва*

СО₂ ЛАЗЕРНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ КУПИРОВАНИЯ ХРОНИЧЕСКОГО БОЛЕВОГО СИНДРОМА

Разработан физиотерапевтический аппарат на основе компактного отпаянного волноводного СО₂-лазера. Применение основано на анальгетическом действии низкоинтенсивного ИК-лазера. Из-за отсутствия нагрева облучаемых тканей, негативные побочные эффекты не наблюдаются. Аппарат будет особенно востребован при неизлечимых хронических заболеваниях, при которых развивается резистентность к лекарственным препаратам, или когда их применение становится невозможным из-за развития побочных эффектов при их длительном использовании.

V.E. ROGALIN, M.I. KRYMSKY¹, S.S. KOLCHIN²,
S.M. ARANCHII³, I.A. KAPLUNOV

Tver State University

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

²*Scientific and Production Corporation «Systems of Precision Instrument Making»,
Moscow*

³*MEV-Technologies, Moscow*

CO₂ LASER APPARATUS FOR CUPPING OF CHRONIC PAIN SYNDROME

A physiotherapeutic device based on a compact sealed waveguide CO₂ laser has been developed. The application is based on the analgesic action of a low-intensity IR-laser. Due to the lack of heating of the irradiated tissues, negative side effects are not observed. The device will be especially in demand for incurable chronic diseases, under which resistance to drugs develops, or when their use becomes impossible due to the development of side effects with their long use.

Представлена прикладная часть многолетнего цикла исследований нового эффекта квантовой терапии сотрудников Института физиологии им. И.П. Павлова РАН [1]. Реализован механизм специфического

воздействия низкоинтенсивного лазера на мембрану сенсорного нейрона, приводящего к купированию хронической боли. ИК-излучение должно быть в зоне возбуждения Р-О-Р связи молекулы АТФ. Энергия излучения должна быть достаточной для проникновения через кожу к нервным афферентам, через их мембрану к сайту гидролиза молекул АТФ, что приводит к их возбуждению, гидролиз которых запускает трансдукторную функцию нагревного насоса. Это снижает возбудимость медленных натриевых каналов, купируя проявления хронической боли.

Создан низкоинтенсивный лазерный физиотерапевтический аппарат ИК-диапазона для купирования патологической боли различной этиологии (рис. 1), состоящий из компактного волноводного частотно-импульсного CO_2 -лазера; волоконно-оптического кабеля из ИК-оптоволокна из AgCl с фокусатором и фотоприёмником; блока ВЧ накачки лазера; пульта управления; кейса для хранения и транспортировки прибора.



Рис. 1. Вид аппарата

Лазер [2] работает в режиме возбуждения короткими импульсами от 30 до 100 мкс. В этом случае нет перегрева активной среды за импульс, пиковая мощность превышает 10 Вт, разряд хорошо поджигается и позволяет в широких пределах управлять частотой следования импульсов генерации. Средняя мощность излучения в зоне облучения не превышает 1 Вт.

Прибор обеспечивает полную экранировку персонала от лазерного излучения. Разработанное изделие удовлетворяет всем функциональным требованиям и требованиям техники безопасности. Эргономический дизайн пульта и простота управления полностью отвечают запросам медицинских работников.

Список литературы

1. Yachnev I.L., Plakhova V.B., Podzorova S.A., Shelykh T.N., Rogachevsky I.V., Krylov B.V. Mechanism of Pain Relief by Low-Power Infrared Irradiation: ATP is an IR-Target Molecule in Nociceptive Neurons // Medicinal Chemistry. 2012. № 8. P. 14-21.
2. Каштанов Д.А., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Шерстов И.В. Стабилизация линии излучения волноводного CO_2 -лазера для лазерного оптико-акустического детектора утечек SF_6 // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 411-424.

Г.Т. МАСЛОВА, Ж.И. БУЛОЙЧИК, А.П. ЗАЖОГИН,
А.С. МАВРИЧЕВ¹, Л.А. ДЕРЖАВЕЦ¹, А.С. ТРУБЕЦКАЯ,
А.В. ТИТОВА

*Белорусский государственный университет, Минск
¹РНПЦ онкологии и медицинской радиологии, Минск*

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ОПУХОЛЕЙ МОЗГА

Оценены возможности использования лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии с возбуждением спектров сдвоенными лазерными импульсами фаций плазмы крови человека для изучения локального пространственного распределения кальция в качестве дополнительной информации при постановке и уточнению диагноза. Разработанные методики позволяют контролировать назначенное лечение и уточнять динамику развития патологии.

G.T. MASLOVA, J.I. BULOICHIK, A.P. ZAJOGIN,
A.S. MAVRICHEV¹, L.A. DERZHAVETS¹,
A.S. TRUBETSKAYA, A.V. TITOVA

*Belarusian State University, Minsk
¹RRPC of Oncology and Medical Radiology, Minsk, Belarus*

APPLICATION OF LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY THE DRIED DROPS OF BLOOD PLASMA IN THE DIAGNOSIS OF BRAIN TUMORS

The possibilities of using laser atomic emission multi-channel spectrometry with excitation of spectra by double laser pulses of human blood plasma facies to study the local spatial distribution of calcium as additional information in the formulation and refinement of the diagnosis are evaluated. The developed methods allow to control the prescribed treatment and to specify the dynamics of pathology.

В механизме патогенеза раковых новообразований главнейшим звеном следует считать нарушение порядка самоорганизации белка на клеточном уровне. В клинической практике используют около двух десятков онкомаркеров (ОМ), обладающих достаточной диагностической значимостью, в то же время неизвестно ни одного ОМ, соответствующего идеальным параметрам. Для получения однозначного результата

требуется тщательное сравнение многочисленных показателей. Поэтому поиски всестороннего подхода к диагностике ОГМ продолжаются.

Для оценки локального пространственного распределения макро- и микроэлементов в каплях экспериментально с помощью лазерной многоканальной спектрометрии исследованы образцы высушенных капель крови. Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазерное излучение фокусируется на образец фации плазмы крови с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 100 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. На рис. 1, в качестве примера, представлены зависимости интенсивности линий кальция в спектрах высушенных капель плазмы пациентов с диагнозом ОГМ (Б) и донора (Зд).

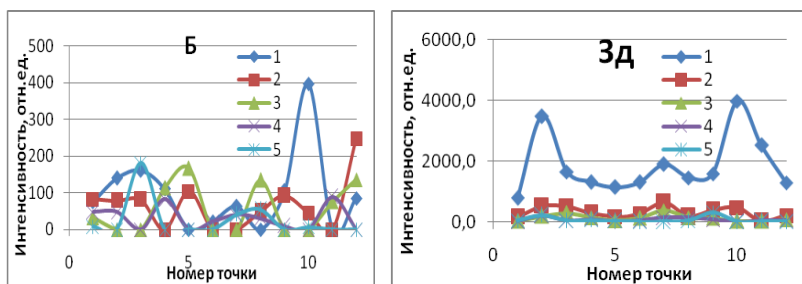


Рис. 1. Интенсивность линии Са II (393,239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях)

Для здорового человека (Зд) характерно уже хорошо изученное равномерное распределение кальция по поверхности высохшей капли с максимальной концентрацией в краевом белковом валике благодаря равномерной диффузии раствора к краям в процессе испарения. При патологии изменение связывающей способности альбумина и других белков приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в более глубоких слоях.

Полученная оперативная информация позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение. Всесторонняя аналитическая информация при обсуждении диагноза будет способствовать более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов и более успешному лечению опухолей головного мозга.

И.В. КРАСНИКОВ, А.Ю. СЕТЕЙКИН, А.Е. КОВТАНЮК¹,
О.Н. ТРОФИМОВА², И.В. ПРОХОРОВ¹, Ж.Г. КИМ³

Амурский государственный университет, Благовещенск

¹*Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

³*Институт науки и технологий, Кванджу, Южная Корея*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЖНОГО ПОКРОВА, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОЧАСТИЦУ ЗОЛОТА, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При лазерной терапии новообразований в кожном покрове определенные перспективы связаны с использованием наночастиц золота, которые позволяют проводить терапию адресно, локализуя поглощенную энергию излучения. В связи с этим представляет интерес моделирование радиационных и тепловых полей, возникающих при прохождении импульсного лазерного излучения через кожный покров, содержащий наночастицу золота. В работе проведено моделирование импульсного лазерного облучения кожного покрова, рассчитано распределение температуры в эпидермисе, содержащем наночастицу золота.

I.V. KRASNIKOV, A.Yu. SETEIKIN, A.E. KOVTANYUK¹,
O.N. TROFIMOVA², I.V. PROKHOROV¹, JAE GWAN KIM³

Amur State University, Blagoveshchensk

¹*Institute for Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

³*Institute of Science and Technology, Gwangju, South Korea*

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SKIN WITH INCLUSION OF NANOPARTICLES UNDER THE LASER IRRADIATION

During laser therapy of neoplasms in the skin, certain prospects are associated with the use of gold nanoparticles, which allow for targeted therapy, localizing the absorbed radiation energy. In connection with this, it is of interest to simulate radiation and thermal fields arising during the passage of pulsed laser radiation through the skin that contains a gold nanoparticle. In this paper, we simulate pulsed laser irradiation of the skin, calculate the temperature distribution in the epidermis containing gold nanoparticles.

Характер взаимодействия лазерного излучения со средой определяется плотностью мощности падающего светового потока, оптическими и теплофизическими характеристиками биологической ткани. В основе

модели лежит уравнение переноса излучения. Рассматривается биологическая среда, на которую направлен поток фотонов, с включенными наночастицы золота.

В качестве модельной области взят цилиндр, заполненный эпидермисом, с высотой и радиусом основания 0.1 мм. Будем полагать, что модельная область подвергается воздействию импульсного лазерного излучения с длиной волны 1200 нм. Внутри области на оси цилиндра на глубине 2 мкм от поверхности размещена наночастица золота радиуса 20 нм. Термофизические и радиационные параметры эпидермиса взяты из [1]. Вычисление коэффициента поглощения для наночастицы золота осуществлено на основе аппроксимационных формул из [2].

Будем полагать, что модельная область находится под воздействием коллимированного импульсного лазерного излучения. Учитывая небольшие оптические глубины, для аппроксимации интенсивности излучения будем использовать представление из [1] со следующими параметрами: мощность излучения – 0.1 Вт, радиус пучка – 0.1 мм, частота повторения импульсов в единицу времени – 1000 Гц, ширина импульса в половине максимума – 10^{-11} с.

На основе метода конечных элементов получено распределение температуры в модельной области, изучена стабилизация температурных профилей в точках оси цилиндра на различных глубинах (рис. 1).

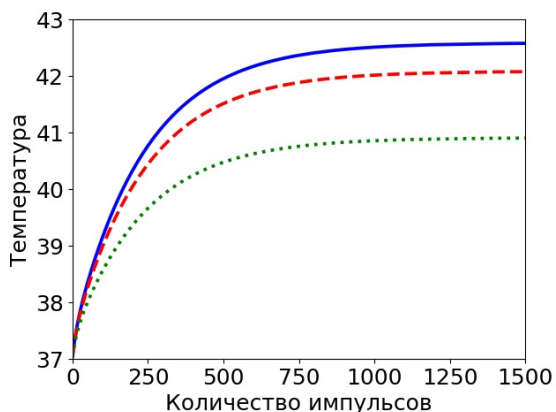


Рис. 1. Динамика температуры в среде на различной глубине: 0.01 мм - сплошная, 0.05 мм - пунктирная и 0.09 мм - точечный график

Список литературы

1. Jiao J., Guo Z. // Phys. Med. Biol. 2009. V. 54. P. 4225-4241.
2. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. New York: Dover Publications, 1981.

А.А. КОВАЛЕНКО¹, И.В. ЯРОСЛАВСКИЙ³, Э.Н. СОБОЛЬ³,
Г.Б. АЛЬТШУЛЕР³, Н.Н. ЕВТИХИЕВ^{1,2}

¹НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХРЯЩЕВУЮ ТКАНЬ

Выполнено экспериментальное исследование тепловых полей при воздействии лазерного излучения волоконного Эрбиевого лазера (длина волны 1,56 мкм) на хрящевую ткань ex-vivo с использованием различных видов дистального конца волоконного инструмента и вариацией параметров лазерного излучения для достижения локального нагрева в зоне воздействия на 10-15 °С.

A.A. KOVALENKO¹, I.V. YAROSLAVSKY³, E.N. SOBOL³,
G.B. ALTSHULER³, N.N. EVTIKHIEV^{1,2}

¹IRE-Polus Corporation, Fryazino

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

³IPG Medical, Marlborough, USA

EVALUATION OF THERMAL EFFECT OF LASER INTERACTION WITH CARTILAGE TISSUE

Ex-vivo experimental study of thermal effect of laser interaction with cartilage tissue was conducted. Er fiber laser emitting at the wavelength of 1.56 μm was used as a laser source. We investigated the effect of the delivery fiber diameter as well as the geometry of the distal end of the fiber instrument on the resulting thermal field. Laser parameters were varied in a wide range. It has been demonstrated that controlled heating of the target zone by 10-15 °C could be achieved without excessive thermal damage of the bulk tissue.

Заболевания опорно-двигательного аппарата занимают по распространенности четвертое место [1]. Наиболее типичными заболеваниями являются артрит, артроз и остеохондроз, которые связаны с дегенеративными изменениями в суставном хряще [2]. Другие, не менее распространенные – остеохондроз и ревматоидный артрит, связаны с нарушением обмена веществ и выявляются только на поздних стадиях [3, 4]. Лечение вышеописанных заболеваний осуществляется

медикаментозной терапией, которая является малоэффективной на поздних стадиях, либо хирургическим путем, который сопровождается рядом осложнений. Сегодня быстро развиваются малоинвазивные методы, среди которых можно отметить метод лазерной регенерации, приводящий к восстановлению ткани и релаксации механических напряжений [5]. Для этого необходимо достичь локальный нагрев ткани на 10-15 °С [6].

Целью данной работы является экспериментальное исследование тепловых полей при воздействии лазерного излучения на хрящевую ткань *ex-vivo* с использованием различных видов дистального конца волоконного инструмента и вариацией параметров лазерного излучения.

Для определения распределения теплового поля на поверхности хрящевой ткани была разработана установка. В качестве источника лазерного излучения использовался лазерный аппарат с длиной волны 1,56 мкм и мощностью до 15 Вт. Для доставки лазерного излучения к биоткани использовалось волокно с плоским торцом и с боковым выходом излучения с диаметром сердцевины 600 мкм. Причем волокно располагалось в контакте с хрящевой тканью, на расстоянии 1 и 5 мм. Измерение тепловых полей проводилось с помощью тепловизора FLIR T650SC. Для достижения локального нагрева в зоне воздействия на 10-15 °С необходимы следующие параметры лазерного излучения:

- для волокна с плоским торцом: длительность импульса/пауза – 100 мс / 900 мс, пиковая мощность – 0,8 Вт; пачка из трех серий: длительность / пауза одной пачки 10 с / 10 с

- для волокна с боковым выходом излучения: длительность импульса/пауза – 100 мс / 900 мс, пиковая мощность – 1 Вт; пачка из трех серий: длительность / пауза одной пачки 10 с / 10 с.

Список литературы

1. Wolf A.D., Pfleger B. Burden of Major Musculoskeletal Conditions. Policy and Practice. Special Theme-Bone and Joint Decade 2000-2010 // Bulletin of the World Health Organization. 2003. V. 81. № 9. P. 646-656.
2. Heinegard D., Saxne T. The role of the cartilage matrix in osteoarthritis // Nat. Rev. Rheumatol. 2011. V. 7. № 1. P. 50-56.
3. Ytrehus B., Carlson C.S., Ekman S. Etiology and pathogenesis of osteochondrosis. // Vet. Pathol. 2007. V. 44. № 4. P. 429-448.
4. Silman A.J., Pearson J.E. Epidemiology and genetics of rheumatoid arthritis // Arthritis Res. 2002. V. 4. P. 265-272.
5. Баграташвили В.Н., Соболев Э.Н., Шехтер А.Б. Лазерная инженерия хрящей. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006.
6. Sobol E., Milner T., Shekhter A., Baum O., Guller A., Ignatyeva N., Omelchenko A., Zaharkina O. Laser reshaping and regeneration of cartilage // Laser Phys. Lett. 2007. V. 4. № 7. P. 488-502.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Д.А. ДОЛГУШКИН¹,
Л.Т. ВОЛОВА¹, В.А. ЛАЗАРЕВ¹, М.Д. МАРКОВА,
Г.П. ТИХОМИРОВА, А.В. ЛОМКИНА

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

¹*Самарский государственный медицинский университет*

ОПТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СУСТАВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЕННОГО СУСТАВА КРОЛИКОВ ПОСЛЕ ХОНДРОПЛАСТИКИ

Приведены результаты исследований различных зон суставной поверхности кроликов после выполнения хондропластики с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР). Определены спектральные особенности интактного хряща и суставной поверхности после замещения дефектов и с помощью введенных коэффициентов проведена оценка качества восстановления суставной поверхности.

E. V. TIMCHENKO, P. E. TIMCHENKO, D. A. DOLGUSHKIN¹,
L. T. VOLOVA¹, V. A. LAZAREV¹, M. D. MARKOVA,
G. P. TIKHOMIROVA, A. V. LOMKINA

Samara National Research University

¹*Samara State Medical University*

OPTICAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE RESTORATION OF THE ARMATED SURFACE OF THE KNEE JOINT OF RABBIES AFTER CHONDROPLASTIC

The results of studies of various zones of the articular surface of rabbits after performing chondroplasty using Raman spectroscopy are presented. The spectral features of the intact cartilage and articular surface after the replacement of defects are determined and the quality of restoration of the articular surface is assessed using the coefficients introduced.

Проблема восстановления полнослойных дефектов суставной поверхности является актуальной в современной травматологии и ортопедии. Сохранение дефекта суставного хряща приводит к прогрессированию деструктивных процессов в суставе. Отсутствие кровоснабжения хряща и низкий уровень метаболизма из-за малого количества клеток в единице объема ткани приводят к тому, что его

полноценная регенерация возможна лишь при небольших по площади и глубине повреждениях [1]. В настоящее время нет надежных методов лечения полнослойных повреждений суставных хрящей.

В качестве основного метода исследований был использован метод СКР, так как скрининговые тесты не позволяют определить качество регенерата после выполнения хондропластики.

Материалом для исследования послужили образцы дистальных эпифизов бедренных костей кроликов. У этих животных в рамках экспериментальной работы после создания полнослойных костно-хрящевых дефектов суставной поверхности мыщелков бедренной кости выполняли их пластику разными способами. В динамике животных выводили из эксперимента и выполняли биопсию дистальных эпифизов бедренных костей с дальнейшим исследованием суставной поверхности с помощью СКР.

Обработка спектров была проведена в программной среде Wolfram Mathematica 10 и заключалась в удалении шумов сглаживающим медианным фильтром по 7 точкам. Затем на выбранном интервале 300-2200 см^{-1} при помощи итерационного алгоритма [2] определяли аппроксимирующую линию (полином пятой степени) автофлуоресцентной составляющей и затем вычитали эту составляющую, получая выделенный спектр КР. Погрешность используемых коэффициентов не превышала 4 %.

В результате исследований различных зон суставной поверхности кроликов после выполнения хондропластики с помощью СКР была:

- проведена оценка спектральных особенностей интактного хряща и суставной поверхности после замещения дефектов. Установлено, что значения оптических коэффициентов характеризуются уменьшением пиков при переходе от зоны интактного хряща к области пластики на волновых числах 956 см^{-1} (PO_4^{3-} (Симметричные валентные колебания фосфата)) и 1069 см^{-1} (CO_3^{2-} (С-О плоскостное валентное)) и относительно постоянными значениями коэффициентов на волновых числах 852 см^{-1} (Пролин), 1250 см^{-1} (Амид III), 1587 см^{-1} (Амид II) и 1660 см^{-1} (Амид I), а также на 1745 см^{-1} ((C=O) Липиды);

- с помощью введенных коэффициентов проведена оценка качества восстановления суставной поверхности после выполнения разных видов хондропластики в динамике.

Список литературы

1. Barnabe C, Bessette L, et al. Sex differences in pain scores and localization in infl ammatory arthritis: a systematic review and metaanalysis. // J. Rheumatol. 2012. V. 39 (6). P. 1221-1230.
2. Timchenko E., Timchenko P., Volova L., et. al. The synovial fluid analysis by using Raman Scattering spectroscopy in order to reduce the synovial joint pathology // IOP. 2018. V. 1038.

А.Б. БУХАРИНА, А.В. ПЕНТО, Р.С. АБЛИЗЕН,
А.И. СИДОРОВ¹, К.Ю. КРАВЕЦ²

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

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

ИОНИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Предложен новый масс-спектрометрический метод анализа биологических объектов при атмосферном давлении с использованием излучения лазерной плазмы. Возможности метода продемонстрированы на примере анализа модельных органических соединений, биологических образцах – мочи мышей.

A.V. BUKHARINA, A.V. PENTO, R.S. ABLIZEN,
A.I. SIDOROV¹, K. Yu. KRAVETS²

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

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

²*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow*

IONIZATION BY LASER PLASMA RADIATION IN THE ATMOSPHERIC-PRESSURE MASS SPECTROMETRY OF BIOLOGICAL OBJECTS

A novel mass spectrometric method for biological objects analysis at atmospheric pressure using laser plasma radiation is developed. The possibilities of the method are showcased by the analysis of model organic compounds, and biological samples – mice urine.

В настоящее время одним из важных направлений развития лазерной масс-спектрометрии является разработка методов анализа веществ и материалов при атмосферном давлении без пробоподготовки. Такие методы чрезвычайно актуальны в биологии и медицине для анализа состава и диагностики патологий в биологических тканях и жидкостях, в системах обеспечения безопасности для определения в реальном времени присутствия наркотических и взрывчатых веществ, в фармакологии для идентификации лекарств.

Разработан новый метод масс-спектрометрического анализа биологических объектов без предварительной подготовки в режиме реального времени при атмосферном давлении [1]. В этом методе (рис. 1) перевод исследуемого объекта в газовую фазу осуществляется посредством лазерной абляции. Продукты абляции затем ионизируются излучением лазерной плазмы. Метод позволяет анализировать газообразные и твёрдые органические объекты, в том числе лекарственные препараты и биологические ткани. Отсутствие предварительной подготовки позволяет сократить время анализа и максимально сохранить информацию об исходном химическом составе исследуемого объекта.

Проведена оценка порога обнаружения метода на примере анализа таблеток лекарственных препаратов. Показана возможность построения пространственной карты концентраций веществ в исследуемом образце с пространственным разрешением на уровне десятков мкм (построения масс-спектрометрических изображений).

С применением методов многомерной статистики к масс-спектрам, полученным предложенным методом, была проведена классификация биологических объектов – мочи мышей (рис. 2).

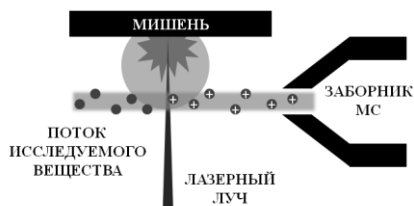


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для анализа веществ в газовой фазе

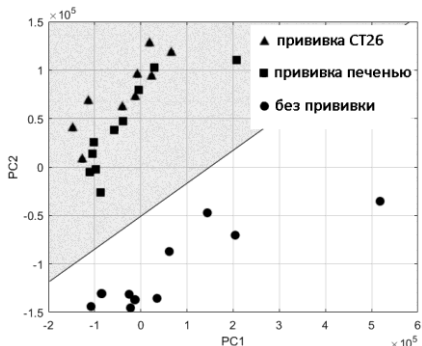


Рис. 2. Спектры мочи мышей, представленные в двух главных компонентах МГК

Список литературы

1. Pento A.V., et. al. // Quantum Electronics. 2013. Т. 43. №. 1. С. 55.

М.П. ПАТАПОВИЧ, А.П. ЗАЖОГИН, А.А. МИНЬКО,
С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ

Белорусский государственный университет, Минск

**РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ
ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОЛОСАХ МАТЕРИ
И РЕБЕНКА МЕТОДАМИ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ
СПЕКТРОМЕТРИИ**

Разработана методика ретроспективной оценки метаболизма эссенциальных элементов в организме человека по определению их содержания в волосах методом атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии при возбуждении спектров сдвоенными лазерными импульсами. Показана возможность проведения ретроспективной оценки метаболизма жизненно необходимых элементов по анализу волос детей с выраженными нарушениями поведения и задержкой развития и их матерей.

М.Р. ПАТАРОВИЧ, А.Р. ЗАЖОГИН, А.А. МИНКО,
С.А. ПАВЛУКОВЕЦ

Belarusian State University, Minsk

**RETROSPECTIVE ESTIMATION OF THE ESSENTIAL
ELEMENTS CONTENT IN THE HAIR OF MOTHER
AND CHILD BY THE ATOMIC-EMISSION
SPECTROMETRY METHODS**

The methods of retrospective estimation of the essential elements metabolism in a human organism by evaluation of their content in the hair of mother and child has been developed with the use of multichannel atomic-emission spectrometry when spectra are excited by double laser pulses. The possibility to have retrospective estimates of metabolism of the essential elements by analysis of the hair of children with marked behavioral disturbances and mental retardation and of their mothers has been shown.

В последнее время все больший интерес представляют комплексные исследования волос матери и больного ребенка для выявления состояния обмена макро- и микроэлементов в организме и оценки психологического воздействия на такой обмен.

Несмотря на обширные исследования, до полного понимания истоков биохимических сбоев еще далеко. Возможно, своевременно проведенная оценка количественных изменений содержания жизненно необходимых

элементов за длительный промежуток времени поможет наметить пути коррекции основных направлений в лечении ребенка.

В работе использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (от 10 до 80 мДж), так и временного интервала между импульсами (от 0 до 100 мкс). Длина волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Все эксперименты проводятся в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении.

При проведении исследований анализировали суммарные результаты действия 30 последовательных лазерных импульсов (энергия 36 мДж, межимпульсный интервал 8 мкс) на точку на образцах волос, наклеенных на скотч, через 0,5 см, что примерно соответствует интервалу роста волос за половину месяца. В случае необходимости каждый участок может быть разбит на точки размером $\approx 0,3$ мм. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты изменения концентрации кальция в образцах волос по их длине двух пар - у детей (1 и 3) и их матерей (2 и 4).

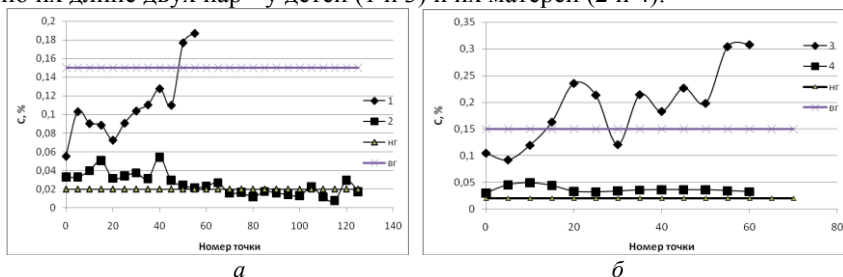


Рис. 1. Концентрация кальция в последовательных точках по длине волос

Концентрации кальция в последовательных точках по длине для образцов волос ребенка и матери представлены на рис. 1а. Видно, что концентрация кальция в течение последней половины года у матери повысилась, и стала чуть выше нижнего значения. В тоже время у ребенка наблюдается существенное понижение уровня кальция. Последнее, говорит, о каком-то стрессовом состоянии у ребенка. Аналогичное, наблюдается и у ребенка 3 (см. рис. 1б) и у матери, но на фоне существенного избытка кальция у ребенка. Анализ волос открывает новые перспективы для решения проблем со здоровьем, потому что выявляет нашу биохимическую индивидуальность. Такой неинвазивный способ получения биоматериала, не связанный с взятием проб крови и травматизацией детей абсолютно безопасен.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Е.В. ПИСАРЕВА,
Я.В. ФЕДОРОВА, А.Н. СУБАТОВИЧ

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ КОСТЕЙ КРЫС ПОСЛЕ ОВАРИОЭКТОМИИ ГИДРОКСИАППАТИТОМ

В данной работе были проведены исследования костных тканей крыс после овариоэктомии методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Определены основные спектральные особенности костной ткани в разных областях кости. Введены критерии, позволяющие определить эффективность лечения остеопороза гидроксиапатитом (ГАП).

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, E.V. PISAREVA,
Ya.V. FEDOROVA, A.N. SUBATOVICH

Samara National Research University

SPECTRAL ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TREATMENT OF BONES OF RATS AFTER OVARIECTOMY WITH GIDROKSIAPATIT

In this paper, studies of rat bone tissue after ovariectomy by Raman spectroscopy were carried out. The main spectral features of bone tissue in different bone regions were determined. The criteria for determining the effectiveness of treatment of osteoporosis with hydroxyapatite (HAP) are introduced.

Остеопороз является полиэтиологическим заболеванием, развитие которого зависит от множества факторов, таких как генетика, гормональный фон, образ жизни. На сегодняшний день нет объективных методик, которые позволили бы выявить ранние изменения в качественном и количественном составе костной ткани при моделировании остеопороза после овариоэктомии. Кроме того, стоит задача подбора оптимального индивидуального восстановления структуры костной ткани. Одним из методов диагностики костной ткани в экспериментах может стать спектроскопия комбинационного рассеяния [1-4].

В качестве материалов исследования были использованы 7 бедренных костей крыс после овариоэктомии с различной концентрацией введённого гидроксиапатита (ГАП) (10 мг, 20 мг, 30 мг).

Все исследования проводились с помощью специализированного стенда, реализующем метод спектроскопии комбинационного рассеяния, который включал в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock SR-303I с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML785.0RB-04 (с регулируемой мощностью до 500 мВт, длина волны 785 нм). Мощность излучения 500 мВт не вызывает никаких деструктивных нарушений ткани. Обработку спектров КР проводили в программе Wolfram Mathematica 9.

Основные спектральные различия костной ткани после овариоэктомии были выявлены на волновых числах 956 см^{-1} (фосфат-ион $(\text{PO}_4)^{3-}$ (ν_1) (P-O симметричное валентное)), 1067 см^{-1} ($(\text{CO}_3)^{2-}$ ν_1) замещение В-типа (C-O плоскостное валентное)), 1266 см^{-1} (Амид III) и 1659 см^{-1} (Амид I). Установлено, что лечение с помощью ГАП, при данной модели остеопороза является эффективным.

Список литературы

1. Morris M.D., Mandair G.S. Raman Assessment of Bone Quality // SYMPOSIUM: BONE QUALITY: FROM BENCH TO BEDSIDE. 2011. 469, P. 2160-2169.
2. Orkoulaa M.G., Vardakia M.Z., Kontoyannisa C.G. Study of bone matrix changes induced by osteoporosis in rat tibia using Raman spectroscopy.
3. Carden A., Rajachar R.M., Morris M.D., Kohn D.H. Ultrastructural Changes Accompanying the Mechanical Deformation of Bone Tissue: A Raman Imaging Study // Calcif Tissue Int. 2003. 72. P. 166-175.
4. Morris M.D., Carden A, Rajachar R.M., Kohn D.H. Bone microstructure deformation observed by Raman spectroscopy // Proc SPIE. 2001. V.4254. P.81-89.

Е.Д. СТАРЦЕВА^{1,2}, В.А. АНДРЕЕВА¹, Н.Н. ЕВТИХИЕВ^{1,2}
¹НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПОЧЕЧНЫХ КАМНЕЙ ПРИ ДРОБЛЕНИИ ТУЛИЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ

Исследованы механизмы дробления почечных камней тулиевым волоконным лазером. Проведено сравнение результатов математического моделирования и экспериментального исследования тепловых полей, образующихся в объеме почечного камня под действием одиночных лазерных импульсов различных энергий в водной среде.

E.D. STARTSEVA^{1,2}, V.A. ANDREEVA¹, N.N. EVTIKHIEV^{1,2}

¹IRE-Polus Corporation, Fryazino

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

INVESTIGATION OF THERMAL FIELDS IN KIDNEY STONES DURING THULIUM FIBER LASER LITHOTRIPSY

The mechanisms of thulium fiber laser lithotripsy of kidney stones have been investigated. The comparison of the results of mathematical modeling and experimental studies of thermal fields produced in kidney stones during the laser radiation of single pulses with different energy in water environment was made.

В настоящее время в хирургической практике используются лазерные литотрипторы, имеющие различные выходные характеристики лазерного излучения, и среди них волоконные лазеры на Tm (тулий) – активированном волокне показали наибольшую эффективность дробления любых типов мочевого камней [1-3]. Технология дробления камней с Tm-волоконным лазером является новой, механизм ее малоизучен. Излучение Tm-волоконного лазера с длиной волны 1.94 мкм не поглощается материалом камня. В свою очередь, почечный камень имеет пористую структуру, в котором пространство пор заполнено водой [4]. Предполагается, что разрушение камня происходит за счет нагрева воды в порах, так как в воде излучение с длиной волны 1.94 мкм имеет локальный пик поглощения. При поглощении излучения водой происходит ее нагревание и расширение, создавая избыточное давление в поре камня. При достижении давления в поре предела прочности на

разрыв (5 МПа [6]), что соответствует температуре воды в поре 78 °С, камень разрушается.

Поэтому целью работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование тепловых полей в объеме почечного камня, образующихся под действием одиночных импульсов с различной энергией Тm-волоконного лазера в водной среде.

В теоретическом и экспериментальном исследованиях использовались следующие характеристики лазерного излучения для воздействия одиночными импульсами: длина волны 1,94 мкм, пиковая мощность 500 Вт, энергии импульса 1, 2 и 3 Дж.

Для теоретического исследования была построена математическая модель, описывающая динамику распространения теплового поля, возникающего вследствие воздействия лазерного импульса Тm-волоконного лазера на почечный камень. Измерение тепловых полей в ходе эксперимента производилось с помощью тепловизора FLIR T650SC. При проведении исследования волокно располагалось в контакте с поверхностью камня.

В результате исследования было определено, что объем удаленного материала при воздействии Тm-волоконным лазером соответствует области камня, в которой температура, полученная в результате математического моделирования, выше 78 °С.

Таким образом, было показано, что основным механизмом разрушения почечного камня при воздействии излучением тулиевого волоконного лазера является поглощение излучения водой в порах камня.

Список литературы

1. Scott N.J., Cilip C.M., Fried N.M. // Proc. SPIE. 2009. V.7161. P. 71611E.
2. Fried N.M. // Lasers in Surgery and Medicine. 2005. V. 37(1). P. 53-58.
3. Blackmon R.L., Irby P.B., Fried N.M. // Lasers in Surgery and Medicine. 2010. V. 42(1). P. 45-50.
4. Hardy L.A., Irby P.B., Fried N.M. // Proc. SPIE. 2018. V. 10468. P. 104680G.
5. Roggan A., Bindig U., Wasche W., Zgoda F. // Applied Laser Medicine. 2003. P.73-99.
6. Blackmon R.L., Irby P.B., Fried N.M. // Journal of Biomedical Optics. 2011. V. 16(7). P/ 071403.
7. Liu Y., Zhong P. // J. Acoust. Soc. Am. 2002. V. 112 (4). P. 1265-1268.

Р.О. ГРИГОРЬЕВ, А.В. КУЗИКОВА, А.П. КУРАСОВА,
М.К. ХОДЗИЦКИЙ, П.С. ДЕМЧЕНКО, А.А. ЗАХАРЕНКО¹,
А.Х. ХАМИД¹, А.В. СЕНЮК¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

*¹Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет
им. акад. И.П. Павлова*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛУДКА ЧЕЛОВЕКА В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДЛЯ ИНТЕРАОПЕРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИИ

Проведён качественный анализ возможности использования метода импульсной терагерцовой спектроскопии для диагностики онкологии желудочно-кишечного тракта человека. Представлены расчёты оптических свойств и спектральных характеристик опухолевых и здоровых тканей желудка. Полученные результаты могут стать основой для создания нового метода интраоперационной диагностики рака желудка.

R.O. GRIGORIEV, A.V. KUZIKOVA, A.P. KURASOVA,
M.K. KHODZITSKY, P.S. DEMCHENKO, A.A. ZAKHARENKO¹,
A.H. KHAMID¹, A.V. SENYUK¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University

INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE HUMAN STOMACH IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE FOR INTEROPERATIVE CANCER DIAGNOSIS

A qualitative analysis of using pulsed terahertz time-domain spectroscopy for cancer diagnosis of the human stomach was done. The calculations of the optical properties and spectral characteristics of the tumoral and healthy tissues are presented in this study. The obtained results can be used as the basis for creating a new method of intraoperative diagnosis of gastric cancer.

При проведении операций по удалению злокачественных образований желудочно-кишечного тракта необходимо чётко различать границу между

здоровой и опухолевой тканями. Однако не все существующие на сегодняшний день методы позволяют проводить эффективную интраоперационную диагностику онкологии [1]. Терагерцовая (ТГц) импульсная спектроскопия, являющаяся новым методом визуализации в медицинских приложениях [2], привлекает все больше внимания ввиду своей неинвазивности, неионизируемости, относительной безвредности по отношению к живым организмам и наличию характерных пиков поглощения различных биологических молекул в ТГц диапазоне частот.

Целью данного исследования является анализ возможности использования метода ТГц спектроскопии для интраоперационной диагностики онкологии желудка путём получения материальных параметров здоровой и опухолевой тканей. На рис. 1 представлена схема импульсного ТГц спектрометра. В установке используется Yb:KYW-лазер (Solar) мощностью 1,1 Вт. Частота повторения 70 МГц, длительность импульса 200 фс, центральная длина волны 1040 нм. В качестве генератора ТГц излучения служит полупроводниковый кристалл InAs, а в качестве детектора – CdTe. Мощность генерируемого ТГц излучения – 120 нВт, частотный диапазон: 0,2-1 ТГц. В качестве исследуемых образцов использовались срезы онкологической и здоровой тканей желудка (рис. 2).

Онкологические клетки, по сравнению со здоровыми, увеличивают ядерную атипию, пролиферацию и некроз тканей, а также содержат большое количество жидкости [3]. Было выявлено различие между оптическими свойствами и спектральными характеристиками онкологической и здоровой тканями методом ТГц спектроскопии.

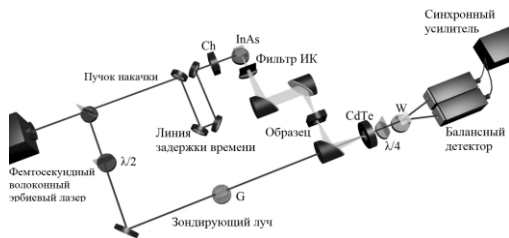


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Фотография образцов

Список литературы

1. Miyashiro I., et. al. // Gastric Cancer. 2014. V. 17. № 2. P. 316-323.
2. Sun Q., et. al. // Quantitative imaging in medicine and surgery. 2017. V. 7. № 3. P. 345.
3. Wesseling P., Kros J.M., Jeuken J.W.M. // Diagnostic Histopathology. 2011. V. 17. № 11. P. 486-494.

А.Ф. РЫБАСЬ, Е.В. ОНИКИЕНКО, А.Н. ВДОВИЧЕНКО
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТКАНЕЙ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ МЕТОДОМ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРИИ

Предложен метод экспресс-диагностики ткани щитовидной железы, основанный на поляризационном анализе оптически активных сред. Исследования касаются статистического анализа поведения С-точек для различных состояний ткани щитовидной железы человека (норма, патология). Экспериментально установлено, что по картине распределения интенсивности и поляризации лазерного излучения, проходящего через ткани щитовидной железы, можно идентифицировать состояние ткани.

A.F. RUBASS, E.V. ONIKIENKO, A.N. VDOVICHENKO
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

ANALYSIS OF THYROID TISSUE STATE BY STOKES POLARIMETRY METHOD

The method of rapid diagnostics of thyroid tissue based on the polarization analysis of optically active substances is proposed. The research concerns the statistical analysis of C-points for various states of human thyroid tissue (normal and pathological). It is ascertained that it is possible to identify the state of the thyroid gland according to the intensity and polarization distribution pictures of laser radiation passed through the tissue.

Статистические данные по заболеваемости различными патологиями щитовидной железы в Крыму не отражают в полной мере остроту проблемы. Это вызвано, прежде всего, недостатком профилактических мер по предупреждению заболеваний, в том числе профилактических осмотров. Актуальным является поиск эффективных методов быстрой предварительной диагностики заболеваний щитовидной железы.

Целью работы является анализ трансформации лазерного пучка при прохождении через ткани щитовидной железы, а также поиск аналитической зависимости изменений состояния поляризации пучка для тканей щитовидной железы.

Исследование заключается в пропускании линейно поляризованного лазерного излучения через различные образцы ткани щитовидной железы (рис. 1), выполненные в виде фиксированных окрашенных срезов, с

последующим поляризационным анализом соответствующих картин распределения интенсивности света (метод Стокс-поляриметрии [1, 2]).

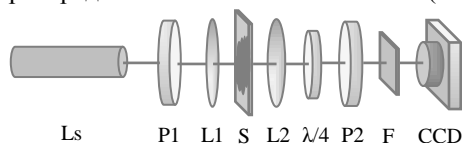


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Выполнен сравнительный анализ микроскопии гистологических срезов ткани щитовидной железы и картин распределения интенсивности и поляризации, а также распределение эллиптичности поляризации для трех случаев: здоровая ткань (норма), диффузный токсический зоб и папиллярный рак щитовидной железы.

Установлено, что при прохождении лазерного пучка через срезы ткани щитовидной железы для различных состояний внутри пучка формируются поляризационные сингулярности типа “LEMON” и “STAR” с противоположными направлениями циркуляции поляризации. Количество С-точек в трех исследуемых группах отличается практически на порядок. Наибольшее количество С-точек выявлено в образцах ткани с патологией папиллярного рака щитовидной железы.

По картине прохождения лазерного излучения через ткани щитовидной железы можно идентифицировать состояние ткани (норма/патология; вид заболевания). Преимуществом данного метода является высокая скорость проведения предварительного анализа состояния тканей щитовидной железы при использовании Стокс-поляриметрии в реальном времени, и возможность автоматизации проведения измерений (рис. 2).

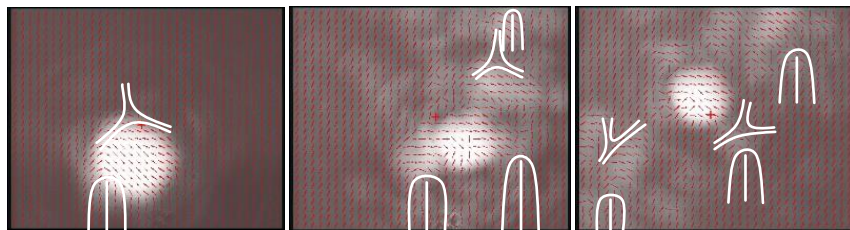


Рис. 2. Распределение интенсивности и поляризации лазерного излучения, прошедшего через ткани щитовидной железы (слева-направо: норма, диффузный токсический зоб, папиллярный рак)

Список литературы

1. Angelsky O.V., Ushenko Yu.A., Balanetska V.O. // Proc. SPIE. 2011. V. 8338. P. 83380S.
2. Ciattoni A., Cincotti G., Palma C. // Optics Express. 2002. V. 10. № 15. P. 699-706.
3. Zenkova C.Yu., Kucherenko I. // Proc. SPIE. 2008. V. 7008. P. 700828.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА¹,
О.О. ФРОЛОВ, И.С. ТИХОВ, Е.Ф. ЯГОФАРОВА

*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

¹*Самарский государственный медицинский университет*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОИМПЛАНТАТОВ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ

Приведены результаты исследования влияния процесса лиофилизации на состав имплантатов твёрдого нёба с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. На основе проведенного анализа были введены оптические критерии, отражающие изменение относительной концентрации компонентов исследуемых биоимплантатов, которые определяют качество имплантатов. Показано, что разрабатываемый оптический метод для оценки биоматериала по значениям спектральных соотношений может быть использован для оптимизации процесса и выбора индивидуализации его параметров обработки.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, L.T. VOLOVA¹,
O.O. FROLOV, I.S. TIHOV, E.F. YUGOFAROVA

Samara National Research University

¹*Samara State Medical University*

SPECTRAL ANALYSIS OF BIOIMPLANTS FOR DENTISTRY

The results of the study of the effect of the lyophilization process on the composition of hard palate implants using Raman spectroscopy. Based on the analysis, optical criteria were introduced reflecting the change in the relative concentration of the components of the bioimplants under study, which determine the quality of the implants. It is shown that the developed optical method for the evaluation of a biomaterial by the values of spectral ratios can be used to optimize the process and select the individualization of its processing parameters.

На сегодняшний день проблема развития и лечения рецессии десны является актуальной, что связано, в первую очередь, с высокой распространенностью патологии, которая составляет по различным данным 45,5-99,3 %. Рецессия десны создает эстетические проблемы, способствуют повышенной чувствительности зубов в результате обнажения корней, формированию абфракционных дефектов, кариеса корня. Лечение десны выполняется хирургическим способом. Однако, в настоящее время, для лечения десны применяют различные биоматериалы

[1]. Однако, не все биоматериалы хорошо приживляются, что связано со способами их производства. Материал из твердого неба, изготовленный по технологии «ЛИОПЛАСТ» обладает многими преимуществами. Однако, при производстве данного материала необходимо выбрать подходящий способ его изготовления, что является актуальной задачей. Оптические методы контроля биоматериала имеют достаточно возможностей в успешном решении данной проблемы, благодаря, неинвазивности и оперативности [2].

Объектами исследования являлись образцы биоимплантов твердого неба, изготовленные по технологии «Лиопласт»®. Образцы были разделены на две группы. Первую группу составили лиофилизированные образцы, вторую группу – образцы без обработки.

В качестве основного метода исследований материалов из твердого неба 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).

Проведена сравнительная спектральная оценка компонентного состава поверхностей образцов имплантатов твердого неба, изготовленных по технологии «Лиопласт», с обработкой лиофилизации и без нее.

Установлено, что основные различия проявляются на волновых числах 1446, 1738 (фосфолипиды), 1660 см⁻¹ (амид I), 852 и 938 см⁻¹ (пролин), 1062 см⁻¹ (GAG's), 1204 см⁻¹ (тирозин), 1555 см⁻¹ (амид II).

Введены коэффициенты и проведён двумерный анализ, который показал, что при обработке сохраняются основные компоненты биоматрикса, что повышает качество материала, обеспечивающего возможность хорошего клинического эффекта при регенеративных процессах.

Таким образом, разрабатываемый оптический метод для оценки биоматериала по значениям спектральных соотношений может быть использован для оптимизации процесса и выбора индивидуализации его параметров обработки.

Список литературы

1. Мустакимова Р.Ф. Особенности течения рецессии десны у пациентов с мышечно-тоническим синдромом. Автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. Казань, 2014.
2. Anderson T.A., Kang J.W., Gubin T., Dasari R.R. Raman Spectroscopy Differentiates Each Tissue From the Skin to the Spinal Cord: A Novel Method for Epidural Needle Placement // Anesthesiology. 2016. V. 125 (4). P. 793-804.

Н.В. КРУПИНА, Е.В. ВЕРИНА, К.А. ХНЫКИНА
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА КРС ГЛЮКОЗЫ

Исследованы спектры КРС при разных параметрах источника света, возбуждающего спектры КРС, для покровного стекла марки THICKNESS размером 18x18 мм, толщиной 0,13-0,17 мм. Покровное стекло использовалось в качестве подложки и для сравнения с полученными спектрами КРС раствора для медленного внутривенного введения вещества, которое содержит 280±40 мм D-глюкозы. Исследование проводилось для сравнения с полученными ранее спектрами КРС для глюкозы.

N.V. KRUPINA, E.V. VERINA, K.A. KHNYKINA
South Ural State University, Chelyabinsk

THE INVESTIGATION OF THE SPECTRUM OF RAMAN SCATTERING LIGHT OF GLUCOSE

Raman spectra were investigated for different parameters of the light source, excitation Raman spectra for a coating glass type THICKNESS size 18x18 mm, thickness 0,13-0,17 mm Cover glass was used as substrate and to compare the obtained spectra cattle solution for slow intravenous injection of a substance that contains 280±40 mm D-glucose. The study was conducted for comparison with previously obtained spectra cattle for glucose.

Для получения спектров КРС раствора D-глюкозы использовали покровное стекло марки THICKNESS с нанесенным раствором для инфузий. Раствор содержащий 280 ± 40 мм D-глюкозы. Сушка раствора осуществлялась при комнатной температуре с использованием местного рассеивающего освещения в течение 15 минут. Концентрация D-глюкозы в аптечном растворе для медленного внутривенного введения определялась поляриметрически.

Спектры КРС для покровного стекла, регистрировались на спектрометре Solar ТП . При получении спектров происходило изменение характеристик возбуждающего спектр КРС излучения: длина волны лазера (632 нм и 472,85 нм), размер дифракционной решетки (150/500, 600/600, 1800/500, 75/Echele), поляризации.

Изучение нулевых спектров. При длине волны 632 нм: изменение поляризации света не влияет на вид полученного спектра, но происходит уменьшение шумов при вертикальной поляризации возбуждающего спектр излучения. Однако вертикальная поляризация влияет на интенсивность, также удалось минимизировать побочный пик (рис. 1).

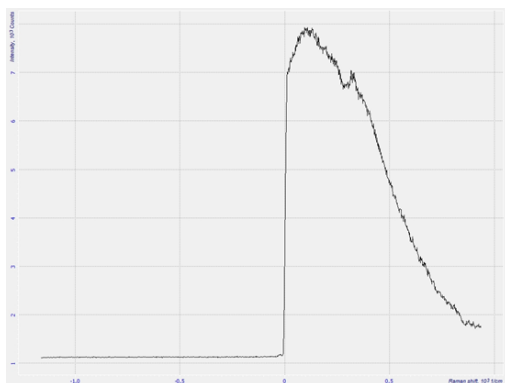


Рис. 1. Вертикальная поляризация, дифракционная решетка 600/600

При длине волны 472 нм с размером решетки 600/600 получили те же данные, что и при длине волны 632 нм с дифракционной решеткой 600/600. Длина волны почти не влияет, но при решетке 150/500 на разных длинах волн получили разные значения КР (рис. 2).

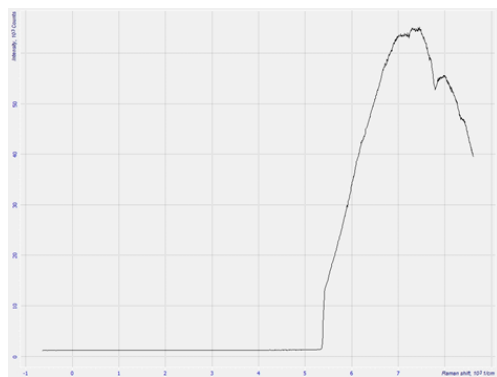


Рис. 2 Дифракционная решетка 150/500

Д.И. ГАЛИАХМЕТОВА, Д.З. ГАЛИМУЛЛИН¹,
М.Э. СИБГАТУЛЛИН

Казанский федеральный университет

¹*Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова*

РАЗДЕЛЕНИЕ СЛОЖНЫХ СПЕКТРОВ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

Приведены результаты применения метода искусственной иммунной системы для решения задачи разложения сложных спектров. Показаны результаты разложения модельного контура, состоящего из трех компонент, представляющих собой контуры Лоренца. Задача разделения сложных контуров является актуальной в спектроскопии при исследовании спектральных контуров с неразрешенной внутренней структурой. Метод искусственной иммунной системы представляет собой оптимизационный метод, основанный на модели поведения иммунной системы и относится к современным методам поисковой оптимизации.

D.I. GALIAKHMETOVA, D.Z. GALIMULLIN¹, M.E. SIBGATULLIN

Kazan Federal University

¹*Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov*

THE SEPARATION OF COMPLEX SPECTRA BY ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM

The results of the application of the method of artificial immune system to solve the problem of decomposition of complex spectra. The results of decomposition of model contour, which consist of three components representing Lorentz's contours are demonstrated. The problem of separation of complex contours is relevant in spectroscopy in the study of the spectral contours with unresolved internal structure. The method of artificial immune system is an optimization method, which base on the behavior of the immune system and refers to modern methods of search engine optimization.

Для реализации алгоритма искусственной иммунной сети биологическим терминам были сопоставлены математические [1]. Роль популяции антигенов выполнял исходный сложный спектр, состоящий из совокупности компонент. За популяцию антител были приняты решения, представляющие собой сумму трех контуров Лоренца, а под термином «подмножество» подразумевалось количество решений. В применяемом методе главным условием отбора лучших антител являлась аффинность (расстояние между антителом и антигеном), которой было сопоставлено

среднеквадратичное отклонение (СКО). Выявленные лучшие антители были клонированы, и их популяции были соотнесены модифицированные решения с наименьшим значением СКО, при этом за коэффициент мутации был принят коэффициент изменения параметров.

Для восстановления элементарных составляющих (рис. 1) были заданы количество компонент в модельном контуре и соответствующие им значения сдвигов [2]. В результате разделения были получены параметры интенсивности и полуширины восстановленных компонент, представленные в табл. 1. Ошибка восстановления интенсивности не превышала 4.0 %, полуширины – 1.7 % от значений параметров модельного контура.

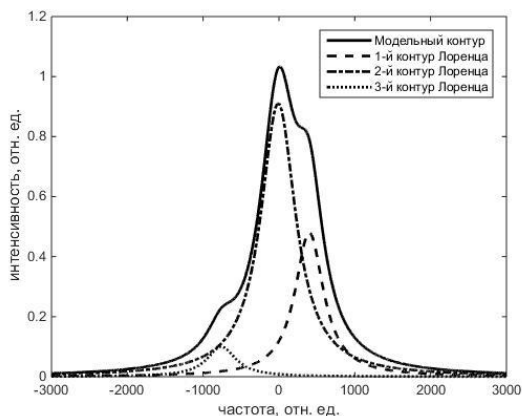


Рис. 1. Разделение трехкомпонентного модельного контура

Таблица 1. Параметры исходного и восстановленного трехкомпонентного контура

Параметр	Модельный контур			Восстановленный контур		
	δ	Δ	I	δ	Δ	I
1-й контур Лоренца	230,0	-400,0	0,50	229,1	-400,0	0,48
2-й контур Лоренца	280,0	10,0	0,90	280,5	10,0	0,91
3-й контур Лоренца	230,0	760,0	0,10	233,9	760,0	0,10

Список литературы

1. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
2. Yagfarov R.R., Sibgatullin M.E., Galimullin D.Z., Kamalova D.I., Salakhov M.K. Deconvolution of complex spectra into components by the bee swarm algorithm // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 714. № 3.

С.В. ВАСИЛЬЕВ, А.Ю. ДАУКША, А.Ю. ИВАНОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ ПАРОПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА

Представлен пример расчета поля плотности электронов пароплазменного облака по интерференционной картине, полученной в ходе лазерно-плазменного воздействия на поверхность металлического образца, с помощью разработанного в ходе исследования программного обеспечения.

S.V. VASILIEV, A.Yu. DAUKSHA, A.Yu. IVANOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

SOFTWARE TO CALCULATE ELECTRON DENSITY FIELD OF STEAM-PLASMA CLOUD

The example of calculation the electron density field in steam-plasma cloud by interference pattern obtained during laser-plasma processing of the metal surface using the developed software is presented.

При диагностике плазмы ручной метод обработки интерферограмм в общем случае предполагает выполнение экспериментатором ряда трудоемких шагов: получение многочисленных изображений интерферограмм с помощью скоростной фоторегистрирующей камеры; вычисление по изображению величины смещения интерференционных полос от невозмущенного состояния; расчет изменения показателя преломления с помощью интегрального уравнением Абеля и вычисление требуемых параметров плазмы [1].

Очевидно, что для достижения положительного эффекта, заключающегося в значительной экономии ресурсов и времени, выделяемых на обработку данных, полученных в ходе эксперимента, а также для повышения точности конечного результата необходимо применение средств программной автоматизации.

Полученное в ходе эксперимента изображение интерферограммы считывается из соответствующего файла и помещается в массив данных для возможности дальнейшей программной обработки. После предварительной обработки изображение преобразуется в бинарное методом отсечения по порогу яркости.

Выбор отдельной полосы на интерферограмме осуществляется путем указания курсором мыши любой точки, находящейся в области полосы (т.н. «затравочного» пикселя).

После указания программе интересующей полосы происходит расчет численных значений смещения полосы, которые сохраняются в массив и готовы к использованию для последующих вычислений.

По полученным данным с помощью интегрального уравнением Абеля, решаемого методом Пирса, вычисляются значения показателя преломления.

Далее находится радиальное распределение электронной плотности для выбранного сечения. После обсчета всех доступных сечений находится и строится в виде трехмерного графика поле плотности электронов пароплазменного облака. На рис. 1 представлен пример рассчитанного поля плотности электронов по интерферограмме полученной в ходе лазерного воздействия на металлический образец.

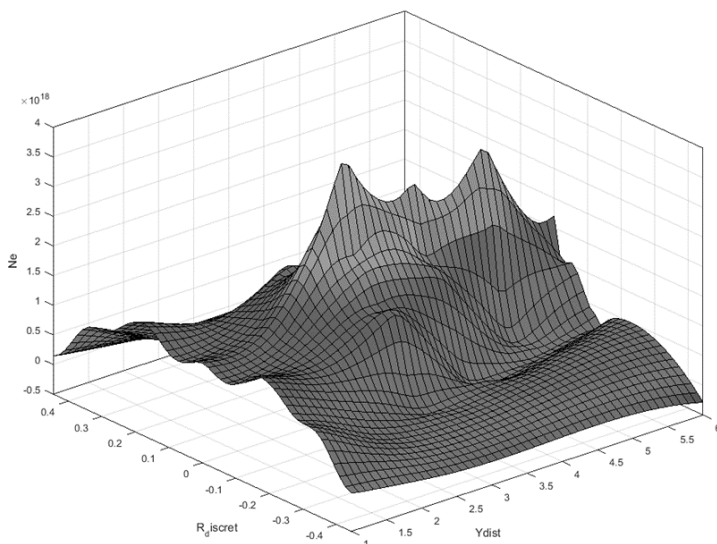


Рис. 1. Поле плотности электронов пароплазменного образования, представленное в трехмерно виде

Список литературы

1. Островский Ю.И. Бутусов М. М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977.

А.В. ПЕНТО¹, А.Р. МУХАМАТНУРОВА^{1,2}, И.И. КУЗЬМИН³

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

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

³*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва*

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДЕСОРБЦИЯ ИОНОВ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 351 И 263 нм

Приведены результаты экспериментов по импульсной лазерной десорбции ионов органических веществ с наноструктурированной поверхности кремния излучением с длинами волн 351 и 263 нм (SALDI – Surface Assisted Laser Desorption and Ionization). Продемонстрирована возможность формирования SALDI-активной поверхности подложки-эмиттера ионов непосредственно в вакуумной камере масс-спектрометра. Рассмотрена возможность расширения круга анализируемых методом SALDI соединений за счёт использования канала фотоионизации на поверхности УФ излучением 4й гармоники лазера (Nd:YLF).

A. V. PENTO¹, A. R. MUKHAMATNUROVA^{1,2}, I. I. KUZMIN³

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

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

³*V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow*

351 AND 263 nm PULSED LASER DESORPTION OF ORGANIC COMPOUND IONS FROM A NANOSTRUCTURED SILICON SURFACE

Experimental results of 351 and 263 nm pulsed laser desorption of organic compounds from a nanostructured silicon surface are presented (SALDI – Surface Assisted Laser Desorption and Ionization). A way of SALDI-active surface formation inside a vacuum chamber of a mass-spectrometer is demonstrated. The possibility of expanding the range of compounds could be successfully analyzed by the SALDI method using a photoionization channel on the surface by the 4th harmonic of the laser (Nd:YLF) radiation is considered.

Процесс лазерной десорбции ионов органических соединений со специально подготовленной поверхности исследуется во многих работах. Этот процесс в англоязычной литературе принято называть SALDI – Surface Assisted Laser Desorption and Ionization. Образовавшиеся в этом процессе ионы регистрируются масс-спектрометром. Процесс

образования иона связан с передачей протона и образованием иона $(M+H)^+$. Наиболее эффективными эмиттерами ионов оказались подложки из материалов на основе кремния.

Вероятность ионизации в методе SALDI ограничена основностью детектируемых соединений, для анализа веществ с основностью ниже 850 кДж/моль [1] применение SALDI оказывается неэффективным. В данной работе рассматривается возможность расширения метода SALDI за счет использования канала фотоионизации на поверхности УФ-излучением (4 гармоника).

В работе использовались подложки-эмиттеры ионов SALDI, получаемые непосредственно в камере масс-спектрометра за счет лазерного переплава поверхности монокристаллического кремния, приводящего к образованию аморфного и нанокристаллического слоя [2]. Эксперименты проводились для ряда летучих соединений с различной основностью.

При использовании излучения 351 нм были зарегистрированы характерные SALDI масс-спектры, основным пиком в которых является ион $[M+H]^+$. Эффективность ионизации падала с уменьшением основности соединения. При облучении подложки излучением 263 нм регистрируются в основном молекулярные ионы, а протонированные ионы появляются в спектре только при плотностях энергии лазера, близких к порогу плавления кремния. Эффективность образования молекулярного иона определяется в основном сечением поглощения молекулы на длине волны 263 нм. Определен порог образования ионов по потенциалу ионизации соединений, составивший 8,8-9,1 эВ.

Для соединений с низкой основностью (менее 800 кДж/моль) вероятность образования ионов M^+ на 3 порядка выше, чем $[M+H]^+$ для тех же соединений. Для соединений, не имеющих полос поглощения и обладающих высокой основностью (алифатические амины) вероятность образования иона $[M+H]^+$ на 2 порядка выше, чем образования молекулярного иона M^+ . Таким образом применение двух частот для лазерной десорбции принципиально расширяет возможности метода.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-01018.

Список литературы

1. Alimpiev S., Grechnikov A., Sunner J., Karavanskii V., Simanovsky Y., Zhabin S., Nikiforov S. On the role of defects and surface chemistry for surface-assisted laser desorption ionization from silicon // J. Chem. Phys. 2008. V. 128. № 1. P. 014711-014719.
2. Гречников А.А., Алимпиев С.С., Никифоров С.М., Симановский Я.О. Способ формирования эмиттера ионов для лазерной десорбции-ионизации химических соединений // Патент РФ № 2426191. 2011.

Р.В. ТЕРЕНТЬЕВ^{1,2}, А.Е. ШИТИКОВ^{1,2}, И.А. БИЛЕНКО^{1,2},
М.Л. ГОРОДЕЦКИЙ^{1,2}

¹*Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл.*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАСТЯНУТЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ

Экспериментально получены растянутые оптические волокна с пропусканием более 40 % и толщиной менее 2 мкм с использованием доступного электрического нагревательного элемента. Представлена оригинальная методика получения растянутых оптических световодов. Полученные растянутые оптические световоды успешно применяются для связи с оптическими микрорезонаторами.

R.V. TERENCEV^{1,2}, A.E. SHITIKOV^{1,2}, I.A. BILENKO^{1,2},
M.L. GORODETSKY^{1,2}

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow region*

²*Lomonosov Moscow State University*

APPLICATION OF ELECTRIC HEATING ELEMENT FOR FIBER TAPERING

We have experimentally obtained optical fiber tapers with a transmittance of more than 40 % and a thickness of less than 2 microns using an available electrical heating element. An original technique for optical fiber tapering is presented. Obtained optical fiber tapers are used for coupling to WGM microresonators.

Растянутые оптические световоды являются одними из наиболее удобных в использовании элементов связи с оптическими микрорезонаторами. Преимуществами растянутых световодов по сравнению с другими элементами связи являются простота использования, компактность и надежность [1], поэтому создание методики получения таких световодов с высоким пропусканием и малой толщиной перетяжки является актуальной задачей.

Ранее для получения температуры размягчения кварцевого стекла (около 1400 °С) при растягивании оптического волокна нами использовалось пламя водородно-кислородной горелки. Одним из недостатков использования водородно-кислородного пламени являются примеси, содержащиеся в газах, которые при попадании на расплавленное

волокно снижают его пропускание. Необходимо соблюдать специальную процедуру предварительной очистки растягиваемого участка [2]; важна правильная юстировка держателей оптического волокна, которые должны быть максимально соосными [3]. Применение прецизионных шаговых двигателей значительно увеличивает повторяемость эксперимента растяжки, а методика качания пламени увеличивает длину расплавляемого участка, что увеличивает длину перетяжки [4, 5]. Электронагревательный элемент обладает рядом преимуществ по сравнению с водородно-кислородной горелкой — он более безопасен, и его температуру легко регулировать.

В нашей экспериментальной установке, подробно описанной ранее [6], для получения температуры размягчения кварцевого стекла использовалась свеча накаливания для дизельного двигателя с керамическим покрытием. Для контроля температуры свечи и подбора оптимальных условий растяжения использовался бесконтактный датчик температуры на основе ИК-фотодиода. В результате экспериментов были подобраны оптимальные условия эксперимента, при которых финальное пропускание волокна было не менее 40 %, а толщина перетяжки составляла менее 1 мкм. Полученные таким образом волокна были использованы для связи с оптическими микрорезонаторами с модами шепчущей галереи, при этом были достигнуты уровни связи 80-90 % (в зависимости от семейства мод).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-02-00522).

Список литературы

1. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011.
2. Hoffman J.E., et. al. // AIP Advances. 2014. V. 4. P. 067124.
3. Warken F. Ultra thin glass fibers as a tool for coupling light and matter. Ph.D. thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universitat, 2007.
4. Birks T.A., Li Y.W. // Journal of Lightwave Technology. 1992. V. 10. № 4. P. 432.
5. Bilodeau F., et. al. // Journal of Lightwave Technology. 1988. V. 6. № 10. P. 1476.
6. Терентьев Р.В. и др., Оптимизация методики изготовления растянутых световодов для связи с оптическими микрорезонаторами // в трудах XVI Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах" ("Волны-2018").

Д.О. ФЕДОРОВ¹, М.Ю. КОРЕНСКИЙ, К.Э. ЛАПШИН,
Д.В. ГАНИН, Д.Ю. КОРЫСТОВ¹, С.К. ВАРТАПЕТОВ
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
¹ООО «Оптосистемы», Москва

СИСТЕМА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СКАНИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЗМЫ ДОВЭ

Представлена система сканирования высокой скорости с использованием призмы Довэ. Приведены результаты формирования паттернов диэлектрического пробоя в поликарбонате (ПК).

D.O. FEDOROV¹, M. Yu. KORENSKY, K.E. LAPSHIN,
D.V. GANIN, D. Yu. KORYSTOV¹, S.K. VARTAPETOV
Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow
¹Optosystems LTD, Moscow

HIGH SPEED OPTICAL SCANNING SYSTEM FEATUREING DOVE PRISM

High speed optical scanning system that incorporates Dove prism is presented. Patterns of dielectric breakdown in polycarbonate are shown.

Фемтосекундные лазеры предоставляют отличные возможности для прецизионной микромодификации материалов [1]. Важно отметить, что для достижения хороших результатов необходимы качественные фокусирующие оптические системы, а также высокоскоростные системы сканирования для минимизации длительности процедуры. Применение объективов с широким полем, покрывающим всю область обработки, вкпе с высокоскоростными управляемыми гальваносканерами предоставляет полную свободу сканирования, однако, при этом обладает рядом важных недостатков. Среди них можно выделить высокие сложность и стоимость разработки и производства оптической системы. В свою очередь, использование подвижного микрообъектива с однокоординатным сканированием по полю обладает значительными ограничениями по набору возможных паттернов сканирования.

Целью работы является усовершенствование оптической системы с подвижным микрообъективом путем внедрения вращающейся призмы

Довэ, что позволит значительно расширить набор паттернов сканирования. На рис. 1 представлена оптическая схема системы. Вращающаяся вокруг своей оси призма Довэ позволяет поворачивать вектор сканирования вокруг его центра [2], в результате чего появляется возможность сканировать объект полосами, с произвольной ориентацией в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения.

Для подтверждения работоспособности системы была собрана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать положение фокуса лазерного излучения путем записи треков диэлектрического пробоя в объеме образцов поликарбоната (ПК). В качестве источника излучения использовался фемтосекундный лазер ($E_{им} = 500$ нДж, 1060 нм, 350 фс, 1 МГц). Для фокусировки был применен микрообъектив с $N.A. = 0.35$ ($f = 30$ мм). Частота резонансного сканера 8 кГц. На рис. 2 представлена фотография паттерна, имеющего форму концентрических колец.

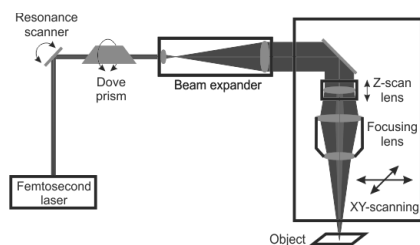


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

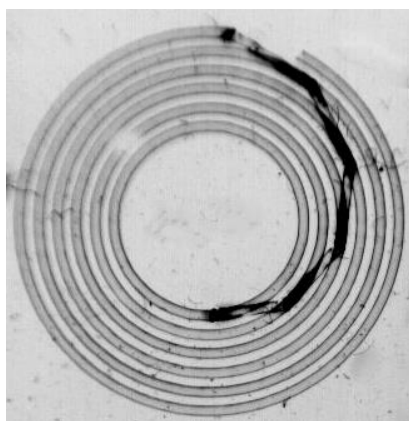


Рис. 2. Фотография паттерна диэлектрического пробоя в ПК

Список литературы

1. Cerami L., Mazur E., Nolte S., Schaffer C.B. Femtosecond Laser Micromachining // In: Ultrafast Nonlinear Optics. Scottish Graduate Series /eds. R. Thomson, C. Leburn, D. Reid. Heidelberg: Springer, 2013.
2. Hanna K.D., Chastang J.C., Asfar L., et al. Scanning slit delivery system // Journal of Cataract & Refractive Surgery. 1989. V. 15. Is. 4. P. 390-396.

Д.С. ДУДОВА, Д.В. ГАНИН¹, Б.С. ШАВКУТА,
О.С. КУПРИЯНОВА², Н.В. МИНАЕВ

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

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

²*Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ*

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Приведены результаты экспериментов по формированию микроструктур из термостабильного полимера методами двух-фотонной стереолитографии. В работе представлены прототипы микролинз, полученные с помощью системы двухфотонной полимеризации. Определены режимы формирования микролинз и условия их использования.

D.S. DUDOVA, D.V. GANIN¹, B.S. SHAVKUTA,
O.S. KUPRIYANOVA², N.V. MINAEV

Institute of Photon Technologies of FSRC «Crystallography and photonics» RAS, Troitsk

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

²*Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude*

LASER FABRICATION OF OPTICAL POLYMER ELEMENTS PROTOTYPES BY ULTRASHORT LASER PULSES

The result of experiments on the formation of microstructures based on thermostable polymer by two-photon stereolithography are given. The work presents prototypes of microlenses obtained using a two-photon polymerization system. The modes of formation of microlenses and the conditions of their use are determined.

Работа направлена на разработку лазерного метода формирования оптической элементной базы с высоким разрешением на основе нового типа термостабильных полимеров для дальнейшего их использования для создания оптических элементов с индивидуальными расчетными характеристиками. Целью работы является сформировать рабочую микролинзу, а также исследовать оптические и механические свойства образца.

Для исследования была использована система двухфотонной фотополимеризации. В качестве источника излучения был использован

высокочастотный иттербиевый лазер с генератором второй гармоники на длине волны 520 нм Avesta. Сканирование осуществлялось с помощью комбинации высокоточных подвижек производства Aerotech и двухзеркального гальваносканера Scanlab. Эта система позволяет достичь точности позиционирования 50 нм. С помощью набора фокусирующих объективов с числовыми апертурами от 0,2 до 1,2 достигалось разное разрешение печати в экспериментах. В качестве фотополимерных композиций были использованы четырехкомпонентные системы, состоящие из поли-N,N'-(м-фенилен) изофталамида (МПА), олигомерных ароматических амидов с концевыми акриламидными группами, активного растворителя и фотоинициатора.

В ходе экспериментов были отработаны различные выходные параметры системы и исследованы полученные образцы. В конечном итоге были отобраны две композиции для дальнейшего формирования микроструктур на их основе. На рис. 1 представлены фотографии полученных микроструктур.

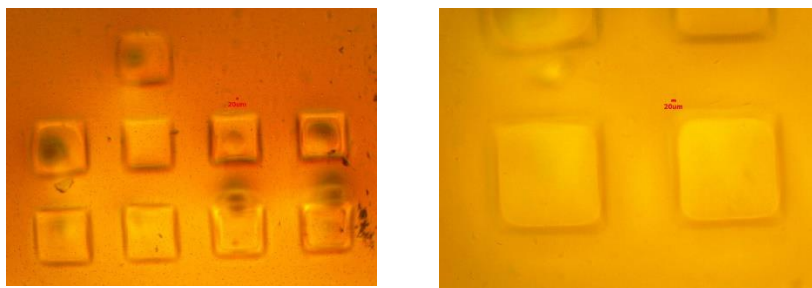


Рис. 1. Фотография матрицы микроэлементов (200x200 мкм) после изготовления, сформированных с помощью двухфотонной стереолитографии, объектив 20X, разрешение полимеризации 1 мкм

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00414_мол_а.

Список литературы

1. Sultanova N.G., Kasarova S.N., Nikolov I.D // Optical and Quantum Electronics. 2013. P. 1-12.
2. Dudova D., Bardakova K., Kholkhoev B., Ochirov B., Gorenskaia E., Farion I., et. al. // Applied polymer. 2018. P. 135.
3. Burdukovsky V., Kholkhoev B., Farion I., Timashev P., Pudovkin G // Phonics. 2016. № 2. P. 46-63.

А.Р. АХМЕТОВ, А.И. ЛЮБИМОВ

Государственный институт прикладной оптики, Казань

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты экспериментов по дифракционной эффективности и стойкости к импульсному излучению диэлектрических дифракционных решеток. Исследована эволюция профиля штриха дифракционной решетки под действием импульсного излучения. Выявлены пределы стойкости различных оптических систем от частоты импульсного излучения.

A.R. AKHMETOV, A.I. LYUBIMOV

State Institute of Applied Optics, Kazan

STUDY ON DIFFRACTION GRATINGS DEFORMATION BY NANOPULSED LASER RADIATION

The paper presents the results of experiments on diffraction efficiency and dielectric diffraction gratings' impulse damage threshold. Besides, we studied the evolution of diffraction gratings relief by laser pulse. We have determined the limits of dielectric diffraction gratings threshold from different laser pulse frequency.

Наносекундные импульсные лазеры предоставляют отличные возможности для обработки материалов с целью получения новых свойств, а лазерная резка позволяет производить детали сложной формы с высокой точностью. Также наносекундные лазеры хорошо себя проявили в ядерной энергетике для запуска реакторов нового типа. Однако, для высокоомощных лазеров требуется стойкий к высоким энергиям излучения компрессор накачки, в роли которого обычно используют дифракционные решетки. Стойкость компрессора зависит от многих факторов:

- оптической схемы компрессора,
- количества отражающих слоев и материала решетки,
- частоты излучения импульсного лазера,
- энергии излучения.

Из литературных данных известно, что стойкость к импульсному излучению выше именно у диэлектрических дифракционных решеток (ДДР). Однако, стойкость обуславливается не только стойкостью

материала отражающего слоя, но и отсутствием деформации самой решетки под действием лазера, которая зависит от профиля решетки.

Поэтому целью работы является экспериментальное исследование ДДР при воздействии на него импульсного излучения для определения характера стойкости.

Проведены измерения дифракционной эффективности (ДЭ) ДДР, стойкости к излучению при различных частотах, определены характеристические параметры излучения. Для измерения ДЭ использовали непрерывный твердотельный лазер ($YLF:Nd^{3+}$, $\lambda = 1053$ нм, $P = 1$ Вт). Источником импульсного излучения является наносекундный твердотельный лазер ($E_{им} = 70$ мДж, $\lambda = 1053$ нм, 5 нс). Анализ профиля пучка проводили при помощи КМОП камеры, рабочая область которого составляет 400-1320 нм. Характеристические параметры излучения исследовали при помощи осциллографа.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для измерения оптических свойств ДДР. В качестве фокусирующего объекта была использована сферическая линза с фокусным расстоянием 750 мм.

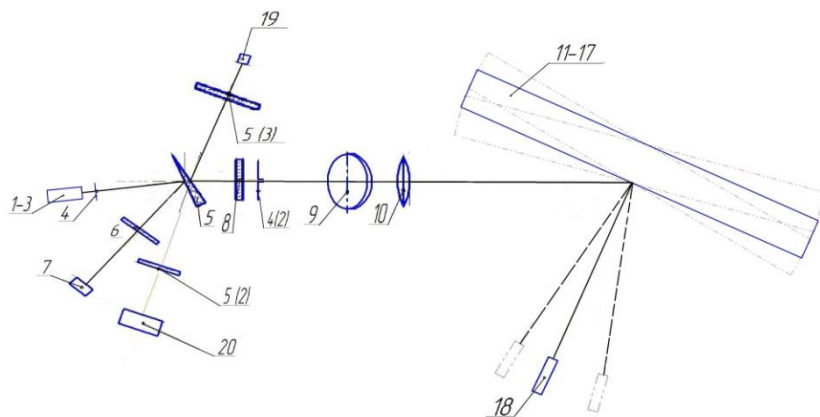


Рис. 1. Универсальная схема экспериментальной установки для измерения параметров ДДР с большой рабочей зоной (до 500x500 мм), где 1, 2, 3 - лазеры (непрерывный, импульсный, юстировочный), 4 - диафрагма, 5 - оптический клин, 6 - отражающий светофильтр, 7 - фотодатчик, 8 - обратное зеркало, 9 - поворотное зеркало, 10 - линза, 11-17 - образцы ДДР различных размеров, 18 - юстировочный лазер, 19 - КМОП камера, 20 - диодный датчик

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*

ДВУХЦВЕТНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР ВИДИМОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ БРЕГГОВСКОГО РЕФЛЕКТОРА ZnS/ZnSe

Исследовано влияние Брегговского рефлектора ZnS/ZnSe на характеристики спектрального отклика МПМ-фотодиода. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных спектров фотоотражения гетероструктуры ZnS/ZnSe/GaAs. МПМ-детектор обеспечивает двухцветный отклик на длинах волн 420 и 472 нм, резкий спад fotocувствительности в длинноволновой части сигнала отклика, высокую квантовую эффективность (53 %) и низкий темновой ток ($5 \cdot 10^{-10}$ А). Узкополосный двухцветный отклик детектора может быть подстроен к желаемой длине волны путем соответствующего выбора параметров гетероструктуры, формирующей Брегговский рефлектор.

S.V. AVERIN, P.I. KUZNETZOV, V.A. ZHITOV,
L.Yu. ZAKHAROV, V.M. KOTOV

Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

TWO-COLOR VISIBLE DETECTOR ON THE BASE OF BRAGG REFLECTOR ZnS/ZnSe

Effect of ZnS/ZnSe Bragg reflector on spectral response of the MSM is investigated. Good agreement was obtained between the calculated and experimental reflection spectra of ZnS/ZnSe/GaAs heterostructure. The MSM detector provides two-color response at 420 and 472 nm, sharp decrease in photosensitivity in the long-wave part of the response signal, high quantum efficiency (53 %) and low dark current ($5 \cdot 10^{-10}$ A). Narrowband two-color response of the detector can be adjusted to the desired wavelength by appropriately selecting the heterostructure parameters.

Брегговский рефлектор выращен методом MOVPE путем последовательного осаждения двадцати пяти периодов ZnS/ZnSe (46,7 / 39 нм) на полуизолирующей подложке (100) GaAs (300 мкм). Состав и толщины отдельных слоев определены методами энергодисперсионного рентгеновского анализа, рамановской спектроскопии и *in situ* рефлектометрии а оптические свойства изучены по спектрам

фотолюминесценции и отражения. Качество ростовой поверхности оценено с помощью атомно-силовой микроскопии. На выращенных структурах сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-детектора с шириной и расстоянием между ними 2,8 мкм при общей площади детектора 100x100 мкм². Исследовано влияние Брегговского рефлектора на характеристики спектрального отклика МПМ-диода. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных спектров фотоотражения гетероструктуры формирующей Брегговский рефлектор.

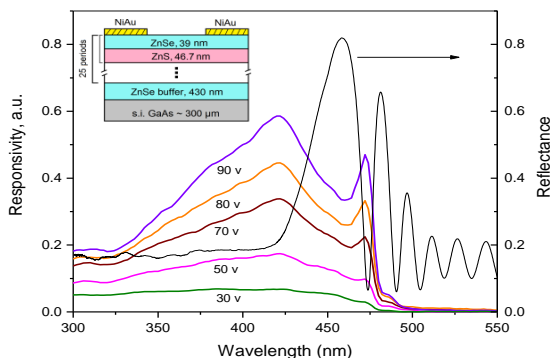


Рис. 1. Спектр фотоотражения периодической гетероструктуры $(\text{ZnS}/\text{ZnSe})_{25}/\text{GaAs}$ и спектральный отклик МПМ-фотодиода на ее основе

Спектр сигнала фотоотклика МПМ-диода (рис. 1) показывает, что Брегговский рефлектор обеспечивает двухцветный узкополосный отклик детектора на длинах волн 420 и 472 нм с резким спадом фоточувствительности в длинноволновой части сигнала отклика (480 нм). Отклик МПМ-диода на длине волны 420 нм соответствует ампер-ваттной чувствительности 0.18 А/Вт и квантовой эффективности 53 %. Темновой ток детектора равен $5 \cdot 10^{-10}$ А при напряжении смещения 40 В, что сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnMgS/GaP с такой же геометрией контактов [1]. Подбором параметров гетероструктуры узкополосный двухцветный отклик фотодетектора может быть подстроен к желаемой длине волны излучения в диапазоне 350–480 нм.

Список литературы

1. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., Zakharov L.Yu., Kotov V.M., Alkeev N.V. // Solid State Electronics. 2015. V. 114. P. 135-140.

В.И. ИВАНОВ, С.Р. СИМАКОВ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

МЕХАНИЗМ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПЛЕНОК

Описаны результаты экспериментального исследования фотоиндуцированного изменения оптических констант в пленках As_2Se_3 в зависимости от длины волны возбуждающего излучения при разных температурах экспонирования. Механизм фоточувствительности халькогенидных пленок интерпретируется в рамках теории локального разогрева микрообластей, в которой ширина фазового перехода связана с разбросом температур фазового перехода.

V.I. IVANOV, S.R. SIMAKOV

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

MODELING PHOTOSENSITIVITY MECHANISMS OF THE CHALCOGENIDE FILMS

The results of an experimental study of photo-induced changes of optical constants of As_2Se_3 films depending on the wavelength of exciting radiation exposure at different temperatures are described. The mechanism of photosensitivity of chalcogenide films is interpreted within the framework of the local heating model where the transition width is related to variation in temperature phase transition.

Фотоиндуцированные механизмы записи оптической информации в халькогенидах имеют ряд преимуществ перед остальными фоточувствительными средами [1-3]. Под действием света меняются различные свойства ХСП и в том числе происходят фотоиндуцированные изменения оптических констант (ФИИОК) [2].

В большинстве работ измерялся только сдвиг края оптического поглощения (КОП), при этом игнорировались изменения такого важного параметра, как наклон края поглощения, который связан со степенью разупорядочения структуры: более упорядоченной структуре соответствует более крутой край [2].

В связи с этим целью данной работы являлось взаимосвязи фоточувствительности пленок разного состава. В работе проводились исследования на образцах As_2Se_3 , напылённых на стеклянную подложку.

На основании анализа экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

- более коротковолновое облучение приводит к меньшему наклону края поглощения;

- понижением температуры экспозиции (при фиксированной длине волны возбуждающего света) КОП становится более пологим [7].

Таким образом, определено, что облучение излучением приводит не только к смещению, но и к изменению наклона урбаховского края поглощения в пленках арсенида мышьяка. Показано, что основные экспериментальные зависимости, описывающие фотоиндуцированные изменения оптических констант, согласуются с моделью микрогетерогенной среды с локальным разогревом микрообластей. Существует ряд моделей, объясняющих те или иные стороны ФИИОК [2-5]. Однако, на наш взгляд, более полно описывает фотоструктурные изменения свойств ХСП-модель [6], основанная на предположении возможности коллективной перестройки микрообласти стекла без образования дефектов. Существенным параметром гетерогенной среды в данной модели служит разброс (дисперсия) свойств различных микрообластей (размеров, температуры размягчения и т.д.) [7].

Полученные результаты представляют интерес для задач технологического управления свойствами халькогенидных фоточувствительных материалов и записи оптической информации в наногетерогенных средах [7-9].

Список литературы

1. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм. Владивосток: Дальнаука, 2006.
2. Борисова З.У. Халькогенидные полупроводниковые стекла. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
3. Иванов В.И. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58 (11-3). С. 153.
4. Ливашвили А.И. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2014. Вып. 6. С. 227.
5. Иванов В.И. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т. 52 (12-3). С. 117.
6. Малиновский В.К. // Автометрия. 1985. № 5. С. 25.
7. Иванов В.И., Симаков С.Р. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2015. Вып. 7. С. 216.
8. Иванов В.И., Карпец Ю.М. // Вестник ДВО РАН. 2003. № 1. С. 93-97.
9. Ivanov V.I., et. al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 735. P. 012013.

А.В. ЗАВГОРОДНИЙ, Ж.Ж. АХАТОВА

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОЙ ПЛЕНКИ ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ

Представлены результаты исследования влияния магнитного поля на подвижность носителей заряда и на вольтамперные характеристики тонкой пленки CuPc. Установлено, что внешнее магнитное поле оказывает влияние на значение тока короткого замыкания, в то же время, подвижность носителей заряда в магнитном поле не меняется.

A.V. ZAVGORODNIY, Zh.Zh. AHATOVA

Buketov Karaganda State University, Kazakhstan

PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF SOLID PHTHALOCYANINE COPPER FILM

The results of a study of the influence of a magnetic field on the mobility of charge carriers and on the current-voltage characteristics of a CuPc thin film are presented. It is established that the external magnetic field affects the value of the short circuit current, at the same time, the mobility of charge carriers in a magnetic field does not change.

Высокая подвижность носителей заряда и высокие фотоэлектрические показатели позволяют рассматривать металло-фталоцианины в качестве перспективных материалов для фотовольтаических устройств [1, 2].

В настоящей работе приведены результаты исследования фотоэлектрических свойств меди и влияния внешнего магнитного поля на вольтамперные характеристики твердой пленки фталоцианина меди. Твердая пленка была получена следующим образом: пленка фталоцианина меди наносилась на подготовленную поверхность стекла с токопроводящим покрытием ИТО методом термического испарения в вакууме (10^{-5} торр). Толщина пленки составила ~ 140 нм. Далее, на поверхность пленки CuPc наносился алюминиевый электрод толщиной ~ 150 нм. Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились при помощи потенциостата-гальваностата Р20Х в режиме линейной развертки. Для исследования влияния магнитного поля на фотоэлектрические характеристики образец помещался между полюсами электромагнита.

На рис. 1 приведены вольтамперные характеристики пленки в магнитном поле. Из рис. 1 видно, что при наложении внешнего магнитного поля наблюдается уменьшение тока короткого замыкания с малым изменением напряжения холостого хода. При максимальном значении внешнего магнитного поля ток короткого замыкания уменьшается более чем в два раза.

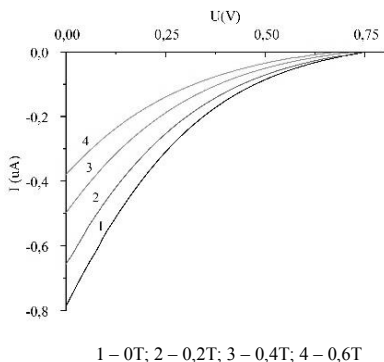


Рис. 1. Влияние магнитного поля на ВАХ

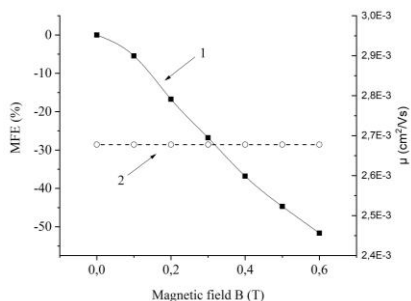


Рис. 2. Зависимости MFE (1); подвижности носителей заряда (2)

MFE (MFE – magnetic field effect) рассчитывался согласно методике [3]. На рис. 2 приведены зависимости MFE и значения подвижности носителей заряда в пленке CuPc от значения приложенного внешнего магнитного поля. Из рис. 2 (кривая 1) видно, что уменьшение тока короткого замыкания составило более 50 % при увеличении магнитного поля от 0 до 0,6 Т. Из того же рис. 2 (кривая 2) видно, что изменение магнитного поля от 0 до 0,6 Т не влияет на подвижность носителей заряда.

Список литературы

1. Берковиц В.Л., Зиминов А.В., Казанский А.Г. Влияние структуры молекул фталоцианинов меди на характер их упорядочения в тонких пленках, спектры фотолюминесценции и поглощения // Физика твердого тела. 2007.
2. Brutting W. Physics of Organic Semiconductors. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
3. Yan L., Wu Y., Xu Z., Hu B. Positive and negative magnetic field effects in organic semiconducting materials // Synthetic Metals. 2009.

М.А. ГОРЯЕВ

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

СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ КРАСИТЕЛЯМИ ФОТОЭФФЕКТА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

Исследована сенсбилизация внутреннего фотоэффекта в полупроводнике в полосе поглощения красителя. Обсуждается механизм сенсбилизации на основе теории безызлучательного индуктивно-резонансного переноса энергии.

M.A. GORYAEV

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg

DYE SENSITIZATION OF PHOTOEFFECT IN MONOCRYSTALLINE SILICON

The internal photoeffect sensitization of the semiconductor was investigated in the dye absorption band. The mechanism of the sensitization based on the theory of non-radiative resonant inductive energy transfer is discussed.

Широкозонные полупроводники эффективно сенсбилизуются красителями в видимой и ближней инфракрасной области спектра и это широко используется в классической фотографии на основе AgHal и в солнечных ячейках на TiO_2 [1-4]. Была показана возможность сенсбилизации красителями СВЧ-фотопроводимости узкозонных полупроводников [5] и обнаружена эффективная сенсбилизация красителями фотопроводимости порошкообразного кремния на постоянном токе [6]. В работе исследован фотовольтаический эффект в монокристаллическом кремнии и влияние на его эффективность нанесенных на поверхность органических красителей.

Увеличение конденсаторной фото-ЭДС в монокристаллическом кремнии достигает нескольких процентов [7, 8], что существенно меньше сенсбилизированного фотоэффекта в порошкообразных образцах, где фотопроводимость полупроводника с нанесенными красителями более чем на порядок превосходит фотопроводимость неокрашенного кремния [6]. Это связано прежде всего с тем, что удельная поверхность мелкодисперсных порошков на несколько порядков больше, чем у монокристалла.

Необходимое условие для сенсбилизации полупроводников – наличие состояний, способных акцептировать энергию от красителя [9, 10]. В кремнии поглощение в области сенсбилизации формируется собственными переходами и энергия красителя эффективно акцептируется полупроводником. Увеличение эффективности генерации носителей определяется тем, что это поглощение формируется непрямыми переходами с относительно небольшими коэффициентами экстинкции. Оптимальная для сенсбилизации концентрация красителя на поверхности монокристалла составляет 30 нм^{-2} . Так как площадь молекул красителя составляет $0.7\text{-}1.4 \text{ нм}^{-2}$ [1], это соответствует оптимальной толщине пленки красителя $10\text{-}15 \text{ нм}$. Поскольку эффективный радиус переноса энергии при сенсбилизации красителями составляет $5\text{-}7 \text{ нм}$ [2], то при большей толщине часть поглощенной энергии не доходит до полупроводника и проявляется фильтровой эффект в полосе поглощения красителя. Спектры сенсбилизированного фотоэффекта смещены относительно спектров фильтрового эффекта. По теории индуктивно-резонансного переноса энергии его константа зависит от интеграла перекрытия спектров люминесценции донора I_d и поглощения акцептора энергии $\varepsilon_a(\nu)$ [11]: $K = C \int I_d n(\nu) \varepsilon_a(\nu) \nu^{-4} d\nu$.

Интеграл перекрытия сильно зависит от волнового числа ν , что подтверждается большим тушением люминесценции красителей в длинноволновой области при передаче энергии твердому телу [12]. В связи с этим эффективность сенсбилизации в длинноволновой области должна быть больше и спектр сенсбилизированного фотоэффекта смещен в область больших длин волн относительно спектра поглощения красителя, который определяет фильтровой эффект.

Список литературы

1. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1980
2. Акимов И.А. и др. Сенсбилизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.
3. Горяев М. Физ.осн фотохимии тв. тела. Saarbrucken: Lambert Acad.Publ. 2013.
4. Gratzel M. // J. Photochem. Photobiol. C: Photochem.Rev. 2003. V. 4. № 2. P. 145.
5. Ионов Л.Н., Акимов И.А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. № 3. С. 881.
6. Горяев М.А. // Журн. физ. химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.
7. Горяев М.А. // Материалы XIV межд. конф. Физика диэлектриков. С-Пб, 2017. С. 58.
8. Goryaev M.A. // Proc. 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. Новосибирск, 2018. С. 13.
9. Горяев М.А. // Сб.научн.тр VII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 420.
10. Goryaev M.A. // VII Intern. Conf. Photonics and Inform. Optics Proceedings. 2018. P. 122.
11. Ермолаев В.Л., Бодунов Е.Н., Свешникова Е.Б. // Усп.физ.наук. 1996. Т. 166. № 3. С. 279.
12. Горяев М.А., Акимов И.А. // Опт. и спектр. 1979. Т. 47. № 2. С. 409.

М.А. ГОРЯЕВ, А.П. СМИРНОВ

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

СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ КРАСИТЕЛЯМИ ФОТОПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК

Обсуждается преобразование энергии в композиционных материалах на основе AgBr – стеарат серебра. Оценивается вклад в спектральную сенсibiliлизацию красителей, адсорбированных как на фотопроводнике, так и на диэлектрике.

M.A. GORYAEV, A.P. SMIRNOV

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

DYE SENSITIZATION OF PHOTOPROCESSES IN DIELECTRIC – SEMICONDUCTOR SYSTEM

The energy transformation in composed materials based on AgBr – silver stearate is discussed. The spectral sensitization by dyes adsorbed as on photoconductor as on dielectrics is estimated.

В спектральной сенсibiliлизации многокомпонентных регистрирующих материалов могут принимать участие красители, адсорбированные как на фоточувствительных полупроводниках, так и на диэлектриках [1, 2]. В работе рассмотрены процессы преобразования световой энергии, поглощаемой адсорбированным на стеарате серебра красителем, и вклад таких красителей в совокупную спектральную сенсibiliлизацию композиций на основе галогенидов и карбоксилатов серебра [1, 3].

В термопроявляемой композиции кубические микрокристаллы галогенида серебра размером 0.1 мкм синтезируется на поверхности частиц стеарата серебра в виде вытянутых призм высотой около микрона [4]. Стеарат серебра является диэлектриком, прозрачным во всей видимой области спектра [5, 6], и адсорбированные на его поверхности красители эффективно люминесцируют. Квантовый выход люминесценции родамина 6Ж, адсорбированного на поверхности стеарата серебра, составляет 0.4-0.45 [2, 7], что сравнимо с этим параметром для адсорбированных на типичных диэлектриках красителей [8].

На галогенид серебра попадает не только прямой свет люминесценции, но и часть света, отражаемая, как в световоде, от внутренних поверхностей частицы стеарата серебра [9]. Эффективность отражения

зависит от предельного угла α , который определяется формулой $\sin \alpha = n_0/n$, где n_0 и n – показатели преломления окружающей среды (связующего вещества – поливинилбутирала) и стеарата серебра соответственно. $n_0 = 1.485$ [10], а $n = 1,515$ [11, 12], поэтому свет в стеарате серебра претерпевает полное внутреннее отражение при углах падения порядка $75^\circ\text{--}80^\circ$. На границе раздела стеарат серебра – галогенид серебра (показатель преломления во всей видимой области более 2.2 [13]) свет эффективно проходит в AgBr. Таким образом, стеарат серебра концентрирует излучаемый красителем свет на микрокристалле галогенида серебра [9]. Оптимальные концентрации адсорбированных красителей в термопроявляемых композициях почти на два порядка выше, чем при сенсбилизации традиционных галоидосеребряных фотоматериалов [1, 14], поэтому несмотря на небольшую эффективность световодного механизма участие адсорбированного на стеарате красителя может быть весьма заметным. Отношение площадей поверхностей стеарата и галогенида серебра $S_{\text{AgSt}}/S_{\text{AgBr}}$ около 30 [4, 9] и в первом приближении на стеарате серебра будет во столько же раз больше адсорбированных молекул красителя. Исследования спектральной чувствительности фотослоев и поглощения красителей показали, что вклады адсорбированных на бромиде серебра красителей и красителей, адсорбированных на стеарате серебра, в общий процесс спектральной сенсбилизации примерно одинаковы [15].

Список литературы

1. Горяев М. Физ. осн. фотохимии тв. тела. Saarbrucken: Lambert Acad. Publ. 2013.
2. Горяев М.А., Смирнов А.П. Сб. научн. трудов: IV Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. С. 266.
3. Sahyun M.R.V. // J. Imaging Science and Technology. 1998. V. 42. № 1. P. 23.
4. Горяев М.А. // Ж. прикладной химии. 1994. Т. 67. № 6. С. 963.
5. Smirnov A.P., Castro R.A., Goryaev M.A. // Межд. научн.-иссл.журн. 2016. № 5. С. 16.
6. Smirnov A.P., Castro R.A., Goryaev M.A., et. al. // Унив.научн.журн. 2017. № 27.С. 69.
7. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Изв. РГПУ. 2015. № 173. С. 50.
8. Горяев М.А. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 11. С. 1132.
9. Горяев М.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 21. С. 40.
10. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия. 1974. Т. 2. С. 781.
11. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Матер. X Межд. конф. «Физика диэлектриков». Т. 1. СПб: изд-во РГПУ. 2011. С. 232.
12. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Изв. РГПУ. 2012. № 144. С. 29.
13. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия. 1980.
14. Горяев М.А., Колесова Т.Б. и др. // Технол. и свойства матер. для записи информ. Сб. научн. трудов НИИХимФотоПроект. М., 1992. С. 67.
15. Горяев М.А. // Ж. научн. и прикл. фотогр. 1998. Т. 43. № 3. С. 1.

Д.А. ТЕМИРБАЕВА¹, Д.А. АФАНАСЬЕВ^{1,2}, Н.Х. ИБРАЕВ¹
¹Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан
²Институт прикладной математики, Караганда, Казахстан

ФОТОПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНА С КРАСИТЕЛЯ НА ПОЛУПРОВОДНИК TiO₂

Приведены результаты исследования фотоиндуцированного переноса электрона в системе бенгальская роза–TiO₂. По результатам измерений интенсивностей и времен жизни флуоресценции и длительной люминесценции красителя сделана оценка эффективности переноса электрона из синглетного и триплетного состояний красителя на полупроводник.

D.A. TEMIRBAYEVA¹, D.A. AFANASYEV^{1,2}, N.Kh. IBRAYEV¹
¹Buketov Karaganda State University, Kazakhstan
²Institute of Applied Mathematics, Karaganda, Kazakhstan

ELECTRON PHOTOTRANSFER FROM DYE TO TiO₂ SEMICONDUCTOR

The result of experiments of photo-induced electron transfer in the Bengal rose – TiO₂ system are presented. According to the results of measurements of intensities and lifetimes of the fluorescence and the long-term luminescence of the dye, the efficiency of electron transfer from the singlet and triplet states of the dye to the semiconductor was estimated.

Появление новых органических сенсбилизаторов приводит к необходимости лучшего понимания сложности и значимости исследования фотопроцессов в сенсбилизаторах, адсорбированных на TiO₂ поверхностях [1].

В данной работе было проведено исследование фотоиндуцированного переноса электрона от возбужденных синглетных и триплетных состояний молекул красителя-сенсбилизатора на диэлектрической и полупроводниковой поверхностях. В качестве объекта исследования был выбран краситель Бенгальская роза (БР). В качестве полупроводниковой поверхности были использованы пленки TiO₂, диэлектриком выступал Silufol (SiO₂). Молекулы красителя сорбировали на поверхность частиц из раствора красителя с концентрацией 10⁻⁵ моль/л. На рис. 1 показаны кинетики быстрой флуоресценции и фосфоресценции БР в указанных пленках (табл. 1).

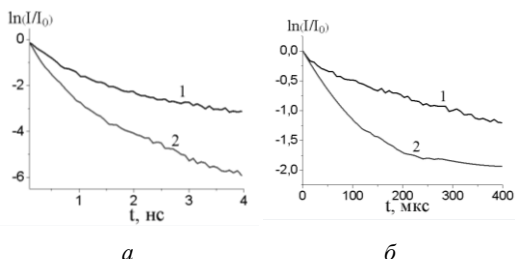


Рис. 1. Кинетики быстрой флуоресценции (а) и фосфоресценции (б) БР на поверхности: 1 - SiO₂; 2 - TiO₂

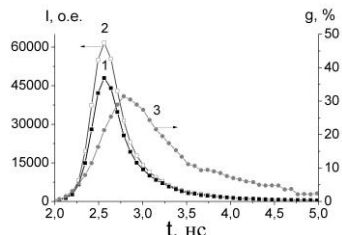


Рис. 2. Влияние магнитного поля на флуоресценцию БР в диоксиде титана: 1 - B = 0 Тл; 2 - B = 0,55 Тл; 3 - g(B)

Таблица 1. Времена жизни быстрой, замедленной флуоресценции и фосфоресценции БР в SiO₂ и TiO₂

Образец	$\tau_{\text{фл}}$, нс	$\tau_{\text{фосф}}$, мс	$\tau_{\text{эф}}$, мс
БР в SiO ₂	0,67	0,400	0,407
БР в TiO ₂	0,37	0,150	0,145

Видно, что наиболее сильное тушение времени жизни свечения было зарегистрировано для образцов на TiO₂. Характерно, что уменьшение времени жизни наблюдается как для быстрого, так и длительного свечения. Из рисунка видно, что в порых TiO₂ наблюдается рост интенсивности люминесценции на 30 % в максимуме интенсивности люминесценции. При этом магнитный эффект g имеет временную зависимость (рис. 2). Наличие влияния внешнего магнитного поля указывает на присутствие в свечении рекомбинационной люминесценции электрон-дырочных пар [2]. Временные характеристики и знак магнитного эффекта говорят об образовании электрон-дырочных пар со средним временем жизни 0,2 нс из синглет-возбужденных молекул красителя.

Таким образом, в твердых пленках наблюдается тушение интенсивности и времени жизни как флуоресценции, так и длительной люминесценции, свидетельствует о передаче электрона как синглет-, так и триплет-возбужденными молекулами бенгальской розы.

Список литературы

1. Enrico R., Mariachiara P., et. al. // Energy Environ.Sci. 2013. V. 6. P. 183-193.
2. Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. // УФН. 1988. Т. 155. С. 3-45.

А.Л. ФИЛАТОВ¹, О.А. ПЕТРОВ^{1,2}, М.А. ЕЛИСЕЕВ^{1,2}

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНОХРОМАТОРА МДР-23 НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ НЕТДУИНО ДЛЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Предложен новый подход к проблеме автоматизации монохроматора MDR-23, основанный на платформе нетдуино, который был протестирован и реализован в экспериментальной установке для фотолюминесцентных исследований полупроводниковых нано-гетероструктур. Полученные экспериментальные результаты подтверждают эффективность разработанной технологии автоматизации.

A.L. FILATOV¹, O.A. PETROV^{1,2}, M.A. ELISEEV^{1,2}

¹*Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

²*MIREA – Russian Technological University, Moscow*

AUTOMATIC CONTROL OF AN MDR-23 MONOCHROMATOR USING STANDART NETDUINO PLATFORM BY WAY OF PHOTOLUNINESCENT GETEROSTRUCTURES IVESTIGATIONS

Novel approach to the problem of automatic control of MDR-23 monochromators that is based on netduino platform was proposed. It was tested and implemented in an experimental setup for photoluminescent studies of semiconductor nanoheterostructures. The obtained experimental results confirm its performance.

Выпущенный в конце прошлого века на фирме ЛОМО монохроматор МДР-23 обладает хорошими спектральными характеристиками и используется для решения различных научных задач [1]. По мере развития информационных технологий его автоматизируют на базе различных платформ, например [2] с использованием микроконтроллера Atmega8535. Предложенная технология использует программируемую на языках высокого уровня бюджетную плату Netduino Plus2 в которой есть порты для управления шаговыми двигателями, 12 разрядный АЦП и возможность коммуникации с компьютером через USB порт (рис. 1).

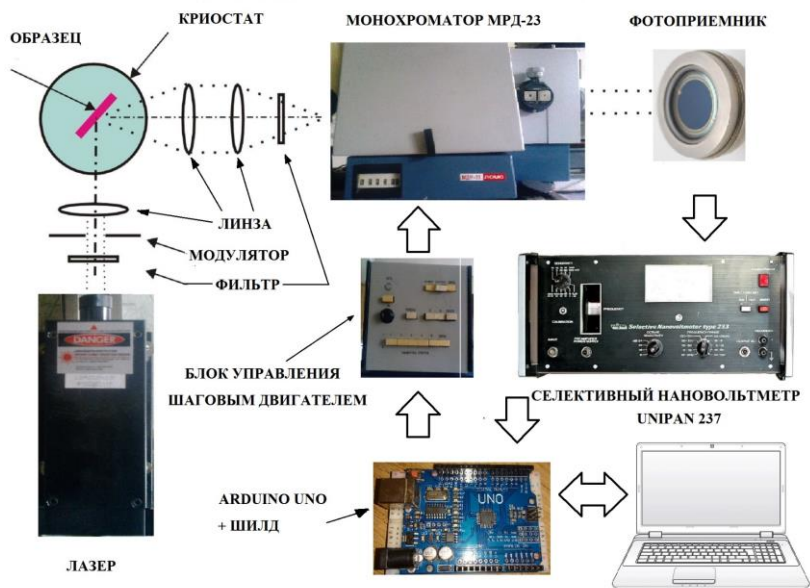


Рис. 1. Схема комплекса

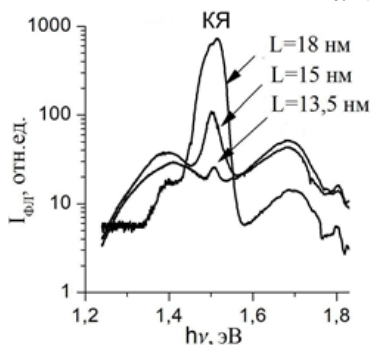


Рис. 2. Спектры люминесценции

В качестве иллюстрации работы созданного комплекса на рис. 2 представлены спектры фотолюминесценции, полученные для структур $n\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}/\text{GaAs}$ с ширинами квантовых ям L , равными 13,5, 15 и 18 нм при плотности оптического возбуждения 1200 Вт/см^2 и температуре 77 К. Видно, что максимальная интенсивность ФЛ из квантовой ямы (КЯ) наблюдается при ширине ямы $L = 18$ нм.

Список литературы

1. Filatov A.L., Mirgorodsky V.I., Sablicov V.A. // Engineering Optics. 1993. V. 6. № 3. P. 321-326.
2. Kramin S P., Zobov E.M., Zobov M.E. // Journal of Applied Spectroscopy. 2015. V. 82. № 2. P. 313-316.

А.В. ШТАРЕВА^{1,2}, А.В. СЮЙ¹, Д.С. ШТАРЕВ², Е.О. НАЩОЧИН¹

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения

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

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР, СОСТОЯЩИХ ИЗ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ ВИСМУТАТОВ СТРОНЦИЯ

Приведены результаты измерения фотокаталитической активности гетероструктур, состоящих из двух различных по составу висмутатов стронция. Впервые показано, что в отдельных случаях такие гетероструктуры могут проявлять значительно большую фотокаталитическую активность, чем входящие в его состав соединения по-отдельности.

A.V. SHTAREVA^{1,2}, A.V. SYUY¹, D.S. SHTAREV²,
E.O. NASHCHOCHIN¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

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

PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF HETEROSTRUCTURES CONTAINING OF TWO DIFFERENT STRONTIUM BISMUTHATES

The results of measuring the photocatalytic activity of heterostructures consisting of two strontium bismuthates of different composition are given. It has been shown for the first time that in some cases such heterostructures may exhibit significantly greater photocatalytic activity than the compounds contained in it separately.

Висмутаты стронция являются перспективными фотокатализаторами видимого света для различных областей применения [1-7]. На сегодняшний день исследованы фотокаталитические свойства значительного количества висмутатов стронция, а также ряда гетероструктур на основе висмутатов стронция [8]. В данной работе исследуются фотокаталитические свойства гетероструктур, состоящих из двух различных висмутатов стронция из следующего ряда: $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$, $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6$ and $\text{Sr}_6\text{Bi}_2\text{O}_{11}$. Гетероструктуры были получены методом твердофазного синтеза. Фотокаталитическая активность исследовалась по скорости разложения фенола в водном растворе.

На рис. 1 показана фотокаталитическая активность гетероструктур на основе висмутатов стронция. Видно, что создание гетероструктур на

основе различных висмутатов стронция сказывается на фотокаталитической активности.

Проведенные исследования показали перспективность дальнейшего исследования фотокаталитической активности гетероструктур, состоящих из различных висмутатов стронция. В частности, показано, что фотокаталитическая активность отдельных висмутатов стронция может быть значительно увеличена введением небольшого (порядка нескольких процентов) количества другого, даже фотокаталитически неактивного, висмутата стронция. Так как в настоящее время исследованы фотокаталитические свойства семи различных висмутатов стронция, это делает крайне перспективным вопрос создания новых гетероструктур на основе двух и более различных висмутатов стронция и изучения особенностей их фотокаталитической активности.

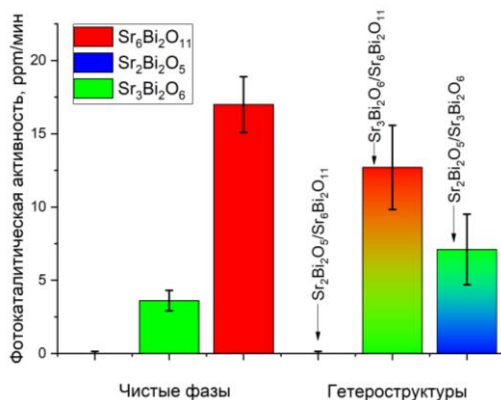


Рис. 1. Фотокаталитическая активность гетероструктур на основе висмутатов стронция, для сравнения – фотокаталитические активности чистых фаз висмутатов стронция взята из [7]

Список литературы

1. Yingchun Y., Xinzhi W., et. al. // Appl. Mechanics and Materials. 2014. V. 522-524. P. 411.
2. Zhou W., Yu X. // Desalination and Water Treatment. 2011. V. 30 (1-3). P. 295.
3. Shan Z., Xia Y., et. al. // Materials Letters. 2009. V. 63. P. 75.
4. Obukuro Y., Matsushima S., et. al. // J. of Alloys and Compounds. 2016. V. 658. P. 139.
5. Hu X., Hu C., et. al. // Applied Catalysis B: Environmental. 2006. V. 69. P. 17.
6. Hu C., Hu X., et. al. // Environmental Science & Technology. 2006. V. 40. P. 5508.
7. Shtarev D.S., Shtareva A.V., et. al. Catalysis Today. DOI: 10.1016/j.cattod.2018.09.035.
8. Штарев Д.С., Карпович Н.Ф. и др. // Вестник ДВО РАН. 2018. Т. 198 (2). С. 237.

А.Е. САДЫКОВА, Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА, Н.Х. ИБРАЕВ
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ TiO₂

Исследовано влияние толщины пленок TiO₂, нанесенных методом doctor-blading, на их оптические и фотокаталитические свойства. Показано, что наилучшей фотокаталитической активностью обладают пленки толщиной 10-12 мкм.

A.E. SADYKOVA, E.V. SELIVERSTOVA, N.Kh. IBRAYEV
Buketov Karaganda State University, Kazakhstan

RESEARCH OF PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TiO₂

The effect of the thickness of the TiO₂ films deposited by the doctor-blading method on their optical and photocatalytic properties was studied. It is shown that films with a thickness of 10-12 μm have the best photocatalytic activity.

В последнее время большую привлекательность приобрела идея создания дешевых и технологичных органических солнечных батарей с использованием широкозонных оксидных полупроводников и органических красителей (DSSCs). В последние годы много усилий посвящено синтезу и исследованию материалов для таких ячеек.

В большинстве работ, посвященных нанокompозитам на основе TiO₂, электроды для фотокаталитической ячейки приготавливаются методом doctor-blading [1, 2]. Данный метод позволяет получить более толстые пленки с толщиной 5-10 мкм.

В настоящей работе была разработана технология получения полупроводникового слоя для композитных пленок с помощью метода doctor-blading и изучено влияние условий нанесения пленок на их структурные свойства.

Нанесение пленок методом doctor-blading приготовили согласно методике, приведенной в работе [3]. Толщина пленок изменялась с помощью используемого скотча – от 1 до 5 слоев, толщина 1 слоя равна 10 мкм.

Была исследована поверхностная структура приготовленных пленок TiO₂ и измерена их толщина. Как показали СЭМ изображения (рис. 1), в пленках после отжига формируются поры.

Полученные данные показали, что данный метод позволяет получить пленки толщиной от 10 до 40 мкм.

При исследовании фотокаталитической активности пленок TiO_2 , приготовленных методом doctor-blading, а также пленок на основе HC TiO_2 была разработана установка по регистрации фотоиндуцированного тока. В качестве электрода сравнения использовали противозлектрод Ag/AgCl . Измерения проводились в водном растворе 0,1 М NaOH . Источником излучения служила ксеноновая лампа, мощность которой составляла $35 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Результаты измерений показаны на рис. 2.

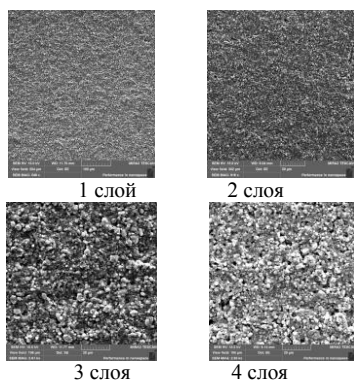


Рис. 1. СЭМ изображения пленок TiO_2 , нанесенных методом doctor-blading

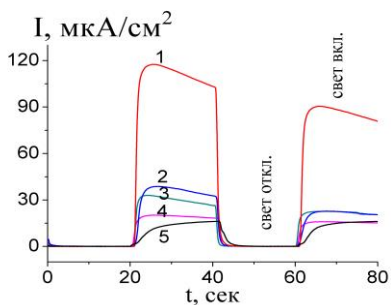


Рис. 2. Фотоиндуцированный ток пленок TiO_2 , приготовленных методом doctor-blading при различной толщине, слой: 1 - 1; 2 - 2; 3 - 3; 4 - 4; 5 - 5

Таким образом, при исследовании фотокаталитической активности пленок TiO_2 , приготовленных методом doctor-blading наибольшие показатели фототока были зарегистрированы для однослойных пленок, со средней толщиной около 10-12 мкм.

Список литературы

1. Zhang H., Lv X.J., Li Y.M., Wang Y., Li J.H. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst // ACS Nano. 2010. V. 4. P. 380-386.
2. Zhang X-Y., Li H-P., Cui X-L., Lin Y. Graphene/ TiO_2 nanocomposites: synthesis, characterization and application in hydrogen evolution from water photocatalytic splitting // J. Mat. Chem. 2010. № 20. P. 2801-2806.
3. O'Regan B., Gratzel M. // Nature. 1991. V. 353. P. 737-741.

А.Ж. ЖУМАБЕКОВ, Н.Х. ИБРАЕВ, А.Е. САДЫКОВА,
Е.В. СЕЛИВЕРСТОВА

Казахдинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКОМПОЗИТА TiO₂-GO

Синтезирован нанокompозитный материал на основе TiO₂ и оксида графена. Формирование нанокompозита было исследовано и подтверждено методами рамановской и ИК-спектроскопии. Изучены фотокаталитические свойства синтезированного материала.

A.Zh. ZHUMABEKOV, N.Kh. IBRAYEV, A.E. SADYKOVA,
E.V. SELIVERSTOVA

Buketov Karaganda State University, Kazakhstan

RESEARCH OF PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TiO₂-GO NANOCOMPOSITE

A nanocomposite material based on TiO₂ and graphene oxide was synthesized. The formation of the nanocomposite was investigated and confirmed by Raman and IR spectroscopy. Studied the photocatalytic properties of the synthesized material.

Диоксид титана является широко используемым материалом в различных областях – в фотокатализе, в сенсibilизированных солнечных ячейках, при очистке воды и т.д. Оксид графена обладает высокой подвижностью носителей заряда, оптической прозрачностью, высокой удельной поверхностью и возможностью химической функционализации. Комбинирование свойств этих материалов может быть использовано для получения нанокompозита с улучшенными фотокаталитическими свойствами.

В настоящей работе был синтезирован нанокompозитный материал на основе оксида графена и TiO₂ и исследованы его фотокаталитические свойства. В полученном нанокompозитном материале оксид графена имеет концентрацию, равную 1 % от массы TiO₂ [1].

Исследование полученного материала было выполнено методами электронной микроскопии, ИК-фурье и спектроскопии комбинационного рассеяния света. СЭМ-измерения показали, что нанокompозитные пленки имеют пористую структуру, образованную наночастицами диоксида титана. Однослойные листы оксида графена встроены между

наночастицами TiO_2 . ЭДС анализ образцов подтверждает присутствие титана, углерода и кислорода. По данным ИК-фурье-спектра было зарегистрировано отсутствие функциональных групп, характерных для оксида графена, и наличие колебательных мод растяжения и изгиба Ti-O-Ti . Это свидетельствует о формировании композитного материала $\text{TiO}_2\text{-GO}$ [2].

Из синтезированного порошка методом spin-coating были нанесены пленки на подложки с проводящим слоем ФТО. Измерения фотокаталитической активности проводили в стандартной трехэлектродной ячейке. Измерения показали (рис. 1), что присутствие оксида графена увеличивает значения фототока в 2 раза для пленок нанесенных со скоростью 3000 об/мин, по сравнению с ячейками, на основе чистого TiO_2 .

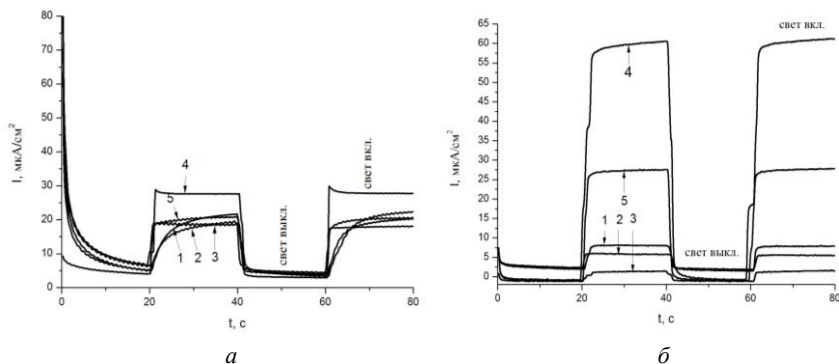


Рис. 1. Фотокаталитическая активность TiO_2 и композита $\text{TiO}_2\text{-GO}$:
 TiO_2 : 1 - 500 об/мин, 2 - 1000 об/мин, 3 - 2000 об/мин, 4 - 3000 об/мин,
 5 - 4000 об/мин (а); $\text{TiO}_2\text{-GO}$: 1 - 500 об/мин, 2 - 1000 об/мин,
 3 - 2000 об/мин, 4 - 3000 об/мин, 5 - 4000 об/мин (б)

Список литературы:

1. Zhang Y., Tang Z.-R., Fu X., Xu Y.-J. TiO_2 Graphene Nanocomposites for Gas-Phase Photocatalytic Degradation of Volatile Aromatic Pollutant: Is TiO_2 Graphene Truly Different from Other TiO_2 Carbon Composite Materials? // ACS Nano. 2010. V. 4. № 12. P. 7303-7314.
2. Zhumabekov A.Zh., Ibrayev N.Kh., Seliverstova E.V. Obtaining and investigation of properties of $\text{TiO}_2\text{-GO}$ nanocomposit //Russian-Japanese Conference Chemical physics of Molecules and Polyfunctional Materials. Orenburg, 2018. P. 82-85.

Р.В. РОМАШКО^{1,2}, И. ЛО³, Ч.-Х. ШИХ³, В.А. КОЛЧИНСКИЙ¹

¹*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

³*Национальный университет Сунь Ят-Сена, Гаосюнь, Китай*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОХРОМНЫХ СВОЙСТВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ, ДОПИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ И МЕДЬЮ

Проведены экспериментальные исследования фотохромных свойств образцов нитрида галлия, допированного железом и медью, при накачках различной длины волны. Наличие фотохромных свойств в нитриде галлия, допированном железом и медью, делает его перспективным для записи динамических голограмм амплитудного типа.

R.V. ROMASHKO^{1,2}, IKAI LO³, CHEN-HANG SHIH³,
V.A. KOLCHINSKIY¹

¹*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

³*National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, China*

INVESTIGATION OF PHOTOCROME PROPERTIES OF GALLIUM NITRIDE DOPED BY IRON AND COPPER

Experimental studies of the photochromic properties of gallium nitride samples doped with iron and copper with pumping of various wavelengths have been carried out. The presence of photochromic properties in gallium nitride doped with iron and copper makes it promising for recording dynamic amplitude-type holograms.

К материалам, перспективным с точки зрения нелинейной оптики, относят в настоящее время нитридные кристаллы, область прозрачности которых позволяет создавать устройства спектрального преобразования лазерного излучения не только для видимого и ближнего ИК диапазонов, но и для средней ИК области [1, 2].

В рамках проекта были получены спектры фотоиндуцированного изменения пропускания образцов нитрида галлия, допированного железом (рис. 1а) и допированного медью (рис. 1б) при накачках с различной длиной волны (400, 460 и 665 нм).

Чтобы проверить, с чем связано изменение спектра пропускания и поглощения и определить, являются ли данное изменение следствием люминесценции, были измерены для образцов нитрида галлия,

допированных железом и медью, спектры люминесценции для использованных источников излучения. В результате измерений были обнаружены слабые пики на длине волны 840 нм (в случае накачки 400 и 460 нм) и 850 нм (при накачке 665 нм), что доказывает, что в диапазоне 400-700 нм все спектральные изменения связаны с фотохромными свойствами образца нитрид галлия, допированного железом и медью.

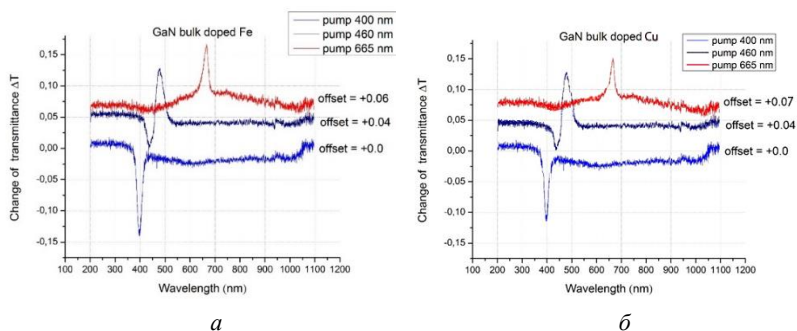


Рис. 1. Спектральная зависимость пропускания образца нитрида галлия, допированного железом (а) и медью (б), при различной накачке (400, 460 и 665 нм)

Таким образом, образцы нитрида галлия, допированные железом и медью, в диапазоне 300-1000 нм проявили фотохромные свойства при облучении его непрерывным монохроматическим излучением на длинах волн 400, 460 и 665 нм. Наличие фотохромных свойств в нитриде галлия, допированном железом и медью, делает его перспективным для записи динамических голограмм амплитудного типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Дальневосточного отделения Российской академии наук (проект № 16-МНТ-004)

Список литературы

1. Abe M., Sato H., Shoji I., Suda J., Yoshimura M., Kitaoka Y., Kondo T. Accurate measurement of quadratic nonlinear-optical coefficients of gallium nitride // JOSA B. 2010. V. 27 (10). P. 2026-2034.
2. Hui R., Taherion S., Wan Y., Li J., Jin S.X., Lin J.Y., Jiang H.X. GaN-based waveguide devices for long-wavelength optical communications // Applied Physics Letters. 2003. V. 82(9). P. 1326-1328.

А.Л. ФИЛАТОВ

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

**НОВАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОСТИ
ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТА В КРЕМНИИ,
ОБУСЛОВЛЕННОЙ ИЗМЕНЕНИЕМ ВЕЛИЧИН
КОЭФФИЦИЕНТА АМБИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ
И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ
ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛУЧА НАКАЧКИ**

Предложена, реализована и проверена на полученных ранее экспериментальных данных новая модель расчета нелинейного фоторефрактивного эффекта в кремнии, возникающая при увеличении интенсивности излучения накачки. Показано, что ее использование позволяет значительно лучше качественно и количественно описать экспериментальные результаты, по сравнению с ранее предложенной квазилинейной моделью, которая так же, учитывает изменение величин амбиполярной диффузии фотовозбужденных носителей и времени жизни в зависимости от концентрации равновесных носителей.

A.L. FILATOV

Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

**NOVEL NONLINEARITY MODEL FOR PHOTOREFRACTIVE
EFFECT IN SILICON THAT IS CAUSED BY CHANGE
OF SEMICONDUCTORS TRANSPORT PARAMETERS
UNDER DIFFERENT INTENSITIES OF A PUMP BEAM**

Novel nonlinearity model is proposed for the photorefractive effect in silicon which is took into account the same semiconductor transport parameters dependence from the pump light intensity as well-known quasi linear model but gives a more accurate qualitative and quantitative correspondence of theoretical calculations and previously obtained experimental data.

Фоторефрактивный эффект [1] в полупроводниках успешно используется для локального бесконтактного определения тепловых [2] и электронных [3] параметров кремниевых структур. Этот эффект возникает при поглощении в объеме образца модулированного по интенсивности излучения накачки, как показано на рис. 1. Вблизи места поглощения периодически возникают градиенты концентрации фотовозбужденных

носителей и температуры, которые в свою очередь, вызывают отклонение зондирующего луча на фотоиндуцируемой оптической неоднородности.

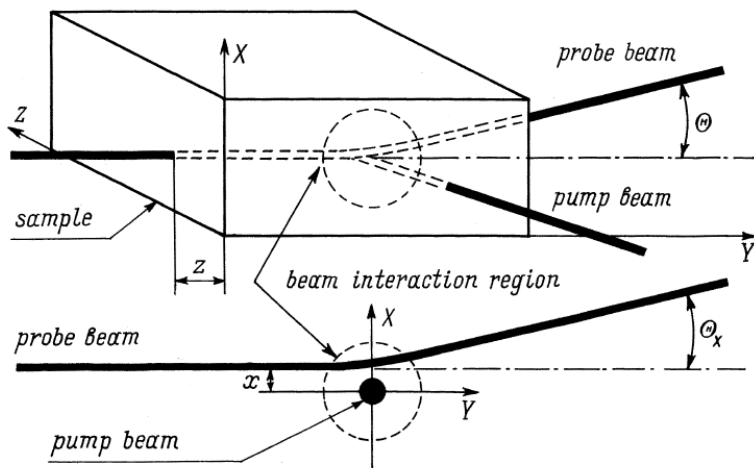


Рис. 1. Трехмерная и двумерная схемы фоторефрактивного эффекта

Амплитудные и фазовые зависимости угла отклонения этого луча Θ от частоты модуляции излучения накачки и от расстояния между зоной поглощения излучения накачки и этим лучом несут информацию о транспортных параметрах образца. В работе [4] было экспериментально показано существование неоднородного эффекта, предложена модель, использующая переменный коэффициент амбиполярной диффузии фотовозбужденных носителей заряда и предложено использовать квазилинейную расчетную модель для определения параметров образцов. Предложенная в этой работе нелинейная расчетная модель позволяет значительно лучше качественно и количественно описать экспериментальные результаты, чем квазилинейная.

Список литературы

1. Filatov A.L., Mirgorodsky V.M., Sablikov V.A. // Semiconductor. Science and Technology. 1993. V. 8. No. 5. P. 694-699.
2. Филатов А.Л. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С.115-118.
3. Филатов А.Л., Кораблев Е.М. // Радиотехника и Электроника. 2007. Т. 52. № 4. С. 498-501.
4. Филатов А.Л., Луговской А.В. // Радиотехника и Электроника. 2009. Т. 54. № 5. С. 611-616.

Р.В. РОМАШКО^{1,2}, Д.Д. ЛЯО³, В.А. КОЛЧИНСКИЙ¹

¹*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

³*Национальный Тайванский университет науки и технологии, Тайбэй*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ СВОЙСТВ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Получены спектры пропускания трифениламин-альт-флуореновый конъюгированный сополимера (HPBPYFL6), нанесенного на стеклянную подложку, при различных приложенных напряжениях. Полученные результаты позволяют утверждать, что сополимер HPBPYFL6 является перспективным материалом для дальнейшего исследования его в качестве оптически и электрически управляемого элемента фотоники.

R.V. ROMASHKO^{1,2}, D.J. LIAW³, V.A. KOLCHINSKIY¹

¹*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

³*National Taiwan University of Science & Technology, Taipei*

STUDY OF ELECTROCHROME PROPERTIES OF NEW FUNCTIONAL POLYMERS

The transmission spectra of triphenylamine-alt-fluorene conjugated copolymer (HPBPYFL6) deposited on a glass substrate were obtained at various applied voltages. The results obtained suggest that the HPBPYFL6 copolymer is a promising material for further research as an optically and electrically controlled element of photonics.

Физические свойства полиимидов задаются химическим составом их мономеров и композиционных добавок. Замена либо модификация блок-сополимеров на стадии полимеризации позволяет модифицировать данный класс соединений под любые задачи [1, 2]. В ходе проведения данной работы был синтезирован и нанесен на подложки стекла трифениламин-альт-флуореновый конъюгированный сополимер (HPBPYFL6) с гексафенилбензолом (HPB) и пиреном в качестве асимметричных подвесных групп. Структурная формула данного сополимера представлена на рис. 1.

Данный образец опускался в кварцевую ванну, наполненную дистиллированной водой, в которой в качестве электролита был растворен 0.1 моль C₆H₈O₇, а в качестве электрода была использована пластинка из

золота. Прикладываемая напряжение к электроду и образцу, на эллипсометре снималось изменение показателя пропускания образца.

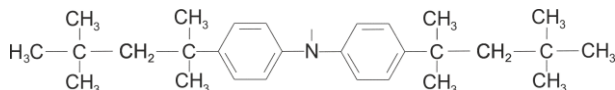


Рис. 1. Структурная формула трифениламин-альт-флуоренового конъюгированного сополимера (НРВРУФЛ6) с гексафенилбензолом (НРВ) и пиреном в качестве асимметричных подвесных групп.

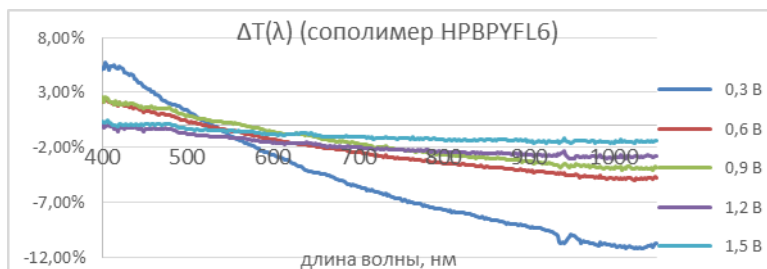


Рис. 2. Изменение спектра пропускания пленки НРВРУФЛ6, нанесенной на подложку из ИТО-стекла, от приложенного напряжения

На рис. 2 представлены изменение спектра пропускания пленки НРВРУФЛ6, нанесенной на подложку из ИТО-стекла, в зависимости от потенциалов, приложенных к электродам. Как видно из рис. 2, в случае прикладываемого напряжения 0,3 В в диапазоне длин волн от 400 до 530 нм наблюдается просветление с максимальным значением 5,5 % на длине волны 405 нм, в то время как в диапазоне от 530 до 1050 нм затемнение с минимальным значением -11 % на длине волны 1030 нм. При постепенном увеличении прикладываемого напряжения от 0,3 до 1,5 В также наблюдается сначала просветление, а потом затемнение в спектре пропускания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Дальневосточного отделения Российской академии наук (проект № 17-МНТ-007).

Список литературы

1. Liaw D.J., et.al. A novel, conjugated polymer containing fluorene, pyridine and unsymmetric carbazole moieties: synthesis, protonation and electrochemical properties // *Dyes Pigm.* 2009. V. 82. P. 109-117.
2. Liaw D.J., Chen W.H., Huang C.C. // *Polyimides and Other High Temperature Polymers.* VSP Publisher, 2003. P. 47-70.

А.П. ШЕСТАКОВА, С.Д. ЛАВРОВ, Ю.Р. ЕФИМЕНКОВ¹

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

¹*Научно-производственное предприятие «Пульсар», Москва*

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ МОНОСЛОЕВ MoS₂: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Создан высокочувствительный фотодетектор на основе монослойного графеноподобного образца MoS₂. Приведен технологический процесс создания и комплексная диагностика фотодетектора с помощью люминесцентной, нелинейно-оптической и атомно-силовой микроскопии. Показан анализ характеристик созданного устройства и выявлено, что его фоточувствительность составляет 1,4 мА/Вт.

A.P. SHESTAKOVA, S.D. LAVROV, Yu.R. EFIMENKOV¹

MIREA – Russian Technological University, Moscow

¹*JSC «RPE «Pulsar», Moscow*

HIGHLY SENSITIVE PHOTODETECTOR BASED ON MoS₂ MONOLAYERS: TECHNOLOGICAL PROCESS

The highly sensitive photodetector based on MoS₂ monolayer created. This functional material was investigated using photoluminescent, non-linear optical and atomic-force microscopy. It is shown that photosensitivity of created device is 1,4 mA/W.

В данной работе представлено создание экспериментального образца фотодетектора на основе монослойного кристалла дисульфида молибдена (MoS₂). Дисульфид молибдена – графеноподобный слоистый материал. Для нанесения на подложки и исследования MoS₂ использовался способ микромеханической эксфолиации монослоев из объемных материалов. Эксфолированный MoS₂ представляет смесь хаотичных микрокристаллитов разной толщины на поверхности подложки. Для выбора и диагностики микрокристаллитов разработан алгоритм методики оптического неразрушающего контроля, включающий атомно-силовую, люминесцентную [1] и нелинейно-оптическую микроскопию [2].

После выбора оптимальных по параметрам кристаллитов были созданы шаблоны для электронно-лучевой литографии для последующего нанесения золотых электродов. Исследование фоточувствительности

детектора проводилось также при помощи оптического микроскопа. При фиксированном значении мощности непрерывного лазерного излучения, сфокусированного на образец, была получена зависимости тока от напряжения, приложенного к электродам.

Для созданного фотодетектора на длине волны 532 нм фоточувствительность составляет порядка 1,4 мА/Вт. Такое значение чувствительности выше, чем у аналогичных устройств, основанных на графене. Высокая эффективность созданного устройства, в отличие от графеновых аналогов [3] обусловлена наличием пары плоских электродов.

Тестирование устройства проводилось при комнатной температуре в воздушной атмосфере и не требовало создания особых условий эксперимента. Отличительной особенностью созданного экспериментального устройства является низкое напряжение (до ± 3 В), необходимое для обеспечения его работоспособности, что на порядок ниже напряжений, прикладываемых к устройствам на основе графена.

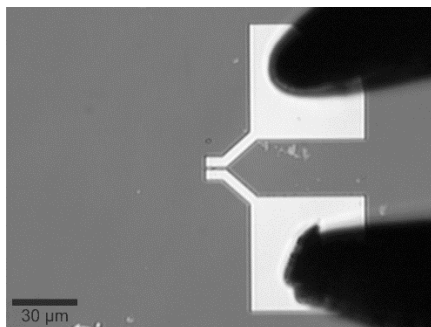


Рис. 1. Оптическое изображение подложки SiO_2/Si с монослоём MoS_2 , заключенным между золотыми электродами

Список литературы

1. Splendiani A., Sun L., Zhang Y., et. al. Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS_2 // Nano Lett. 2010. V. 10. № 4. P. 1271-1275.
2. Kudryavtsev A.V., Lavrov S.D., Shestakova A.P., et. al. Second harmonic generation in nanoscale films of transition metal dichalcogenide: Accounting for multipath interference // AIP Adv. 2016. V. 6. № 9. P. 95306.
3. Xia F., Mueller T., Golizadeh-Mojarad R., et. al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor // Nano Lett. 2009. V. 9. № 3. P. 1039-1044.

Е. СТОЙКОВА, Д. НАЗАРОВА, Б. ИВАНОВ

*Институт оптических материалов и технологий, Болгарская Академия наук,
София, Болгария*

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКЛ-АНАЛИЗА

Динамический спекл-анализ позволяет проводить наблюдение процессов в диффузно-отражающих объектах путем статистической обработки коррелированных во времени спекл-изображений и построения карты активности. В статье представлены эффективные алгоритмы для оценки активности и методы улучшения визуализации полученной карты. Эффективность проверена путем обработки синтезированных и экспериментальных данных.

E. STOYKOVA, D. NAZAROVA, B. IVANOV

*Institute of Optical Materials and Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia,
Bulgaria*

MONITORING OF PROCESSES BY DYNAMIC LASER SPECKLE ANALYSIS

Dynamic speckle analysis enables monitoring of processes in diffusely reflecting objects. An activity map is built by pointwise intensity-based processing of correlated in time speckle patterns. This report presents efficient algorithms for evaluation of activity and methods for visualization enhancement of the obtained map. Efficiency of the proposed approaches is verified by processing synthetic and experimental data.

Статистическая обработка 2D-спекл-изображений на поверхности диффузно-отражающих объектов позволяет обнаружить проявление физической или биологической активности в этих объектах [1]. Этот тип метрологии также применим и к 3D-объектам и обычно требует последовательной записи коррелированных во времени изображений при их освещении лазером [2]. Спекл несет информацию о флуктуациях интенсивности вследствие микроизменений на поверхности объекта. Исследования в области динамического спекл-анализа проводятся в основном в двух направлениях: создание более эффективных методов извлечения информации и адаптация этих методов к новым объектам, как, например, прозрачные материалы или человеческая кожа, в которых формирование спеклов происходит в объеме [3]. Обработка 2D-распределений интенсивности привлекательна тем, что использует

несложное оборудование и обеспечивает обработку в каждой точке. Результатом обработки является двумерная карта оценки данного статистического параметра. Ключевыми проблемами динамического спекл-анализа являются: 1) осуществляется скорее качественный, чем количественный анализ; 2) необходимость создания методов фазового анализа в случае динамических событий; 3) ухудшение временного или пространственного разрешения в зависимости от области, в которой выполняется усреднение для построения карты оценки активности; 4) спекл-шум; 5) вычислительная эффективность; 6) неравномерное освещение, приводящее к флуктуациям интенсивности, зависящим от освещения; 7) зависимость от распределения отражательной способности.

В докладе представлены нормированные и ненормированные алгоритмы [2, 4] обработки коррелированных спекл-изображений и проанализировано их поведение при равномерном и неравномерном освещении. Рассмотрен случай надежного наблюдения процессов с большим изменением временных масштабов. Предложена обработка бинарных изображений, полученных после применения пороговой бинаризации к зарегистрированным спекл-картинам [5]. Фильтрация необработанных данных является нетривиальной задачей, потому что прямая фильтрация для уменьшения спекл-контраста искажает временную корреляцию данных. Предложена обработка исходных данных, которая включает отбрасывание ненадежных данных при неравномерном освещении и обнаружение областей нулевой активности с помощью ненормированного алгоритма. Спекл-природа исходных данных приводит к сильным флуктуациям оценки статистического параметра в карте активности. Это снижает контраст карты и ее правильную интерпретацию. Улучшение контраста этой карты может быть сделано путем ее сглаживания [6]. При сглаживании следует иметь в виду, что оценка активности обычно тоже искажена шумом, зависящим от сигнала. Эффективность разработанных подходов продемонстрирована путем обработки синтезированных и экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда научных исследований в Болгарии, уникальный идентификатор проекта ДН-08/13.

Список литературы

1. Dynamic Laser Speckle and Applications /ed. H.J. Rabal, R.A. Braga Jr. CRC Press, 2009.
2. Stoykova E., Ivanov B., et. al. // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 115.
3. Stoykova E., Blagoeva B., et. al. // Opt. Quantt. Electron. 2018. V. 50. P. 191.
4. Stoykova E., Nazarova D., et. al. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 25128.
5. Stoykova E., et. al., // Opt. Las. Eng. 2017. V. 93. P. 55.
6. Stoykova E., Kang H., et. al. // Opt. Las. Eng. 2018. V. 111. P. 50.

Л.А. МАКСИМОВА¹, Н.Ю. МЫСИНА¹, П.В. РЯБУХО^{1,2},
Д.В. ЛЯКИН¹, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

ПРОДОЛЬНАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ И МГНОВЕННЫЕ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОМ ПОЛЕ С ШИРОКИМИ ЧАСТОТНЫМ И УГЛОВЫМ СПЕКТРАМИ

Исследованы продольные когерентные свойства частично когерентных световых полей с широкими частотным и угловым спектрами. На основе численных расчётов и моделирования мгновенных спекл-структур в волновом поле выполнен анализ когерентных свойств волнового поля в направлении его распространения. Представлены результаты численного исследования эффектов декорреляции мгновенных спекл-структур в оптическом поле.

L.A. MAKSIMOVA¹, N.Yu. MYSINA¹, P.V. RYABUKHO^{1,2},
D.V. LYAKIN¹, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

LONGITUDINAL COHERENCE AND INSTANTANEOUS SPECKLE- PATTERNS IN OPTICAL WAVE FIELD WITH WIDE FREQUENCY AND ANGULAR SPECTRA

The longitudinal coherent properties of partially coherent light fields with wide frequency and angular spectra are investigated. On the basis of numerical calculations and simulation of instantaneous speckle structures in wave field analysis of coherent properties of the field in the direction of its propagation is performed. The results of numerical study of the effects of decorrelation of instantaneous speckle structures in optical field are presented.

Волновое поле протяженного некогерентного источника света имеет ограниченную область и конечное время когерентности возмущений. Длина когерентности зависит как от ширины частотного, так и от ширины углового спектров поля [1, 2]. По истечении времени когерентности существенно изменяются фазовые соотношения волн от элементарных излучателей источника и меняется реализация мгновенной спекл-структуры в поле. При достаточно узком частотном и широком угловом спектрах длина мгновенных спеклов определяется шириной углового

спектра – мгновенная спекл-структура испытывает декорреляционные изменения без распространения в пространстве как целое (рис. 1). При широком частотном и узком угловом спектрах спекл-структура распространяется в пространстве, испытывая декорреляционные изменения на расстоянии, определяемом шириной углового спектра θ (рис. 2).

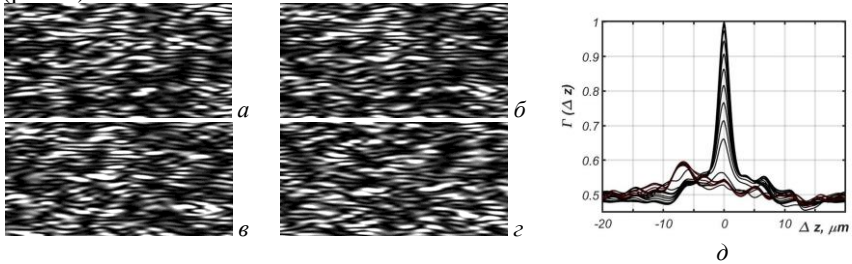


Рис. 1. Продольные мгновенные спекл-структуры ($l_c \gg \rho_{//}$, $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 4 \cdot 10^3 \mu\text{m}$, $l_c \approx \lambda_0^2/\Delta\lambda \approx 75.6 \mu\text{m}$, $\theta = 0.54 \text{ rad}$, $\rho_{//} \approx 3.9 \mu\text{m}$) в моменты времени: $ct = 0$ (а), $ct = 20 \mu\text{m}$ (б), $ct = 40 \mu\text{m}$ (в), $ct = 100 \mu\text{m}$ (г); функции взаимной корреляции мгновенных спекл-структур в разные моменты времени в интервале $ct = 0 \div 100 \mu\text{m}$ (д)

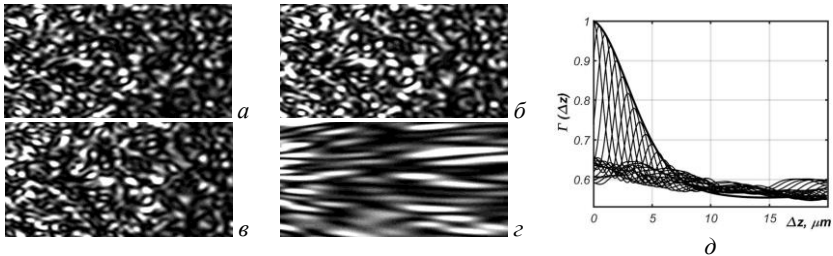


Рис. 2. Продольные мгновенные спекл-структуры ($\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$): $l_c \ll \rho_{//}$ ($l_c \approx 1.5 \mu\text{m}$, $\rho_{//} \approx 12 \mu\text{m}$) (а), (б), (в), $f - l_c \gg \rho_{//} \approx 12 \mu\text{m}$: $ct = 0$ (а), $ct = 2 \mu\text{m}$ (б), $ct = 4 \mu\text{m}$ (в); функции взаимной корреляции мгновенных спекл-структур в разные моменты времени в интервале $ct = 0 \div 15 \mu\text{m}$ ($l_c \approx \lambda_0^2/\Delta\lambda$, $\rho_{//} \approx 2 \lambda_0/\theta^2$) (д)

Представления о мгновенных спекл-структурах и знания их свойств делают более наглядными с физической точки зрения процессы декорреляции волновых полей, в частности, при исследовании слоистых объектов в корреляционной интерференционной микроскопии.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ, проект №16-19-10528.

Список литературы

1. Рябухо В.П., Лякин Д.В., Лычагов В.В. // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. №2. С. 300.
2. Лякин Д.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. В. 3. С. 348.

А.А. АДАМОВ, М.С. БАРАНОВ, В.Н. ХРАМОВ

Волгоградский государственный университет

ВАРИАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Описаны различные вариации модифицированного метода лазерной триангуляции для измерения толщин тонких прозрачных биотканей. Указана схема проведения измерений. Приведены результаты экспериментов на фантомах роговичного слоя и на роговице свиного глаза *ex vivo*. Проведена компьютерная обработка регистрируемых изображений.

A.A. ADAMOV, M.S. BARANOV, V.N. KHRAMOV

Volgograd State University

VARIATIONS OF THE MODIFIED LASER TRIANGULATION METHOD

Described different variations of modified laser triangulation method for measuring the thickness of thin transparent tissues. The scheme of measurement is indicated. The results of experiments on phantoms of the corneal layer and on the cornea of the pig's eye *ex vivo* are presented. Computer processing of recorded images was carried out.

В работе [1] были сформулированы цель и задача исследования, которое направлено на создание безопасного бесконтактного экспресс-метода измерения толщины прозрачных биотканей, в частности, роговицы глаза. Был предложен [1, 2] метод модификации лазерной триангуляции, который позволяет проводить измерения толщины в диапазонах от 0,1 мм до нескольких сантиметров. На рис. 1 показана фотография световых меток (точечная триангулограмма), полученных отражением лазерного излучения от границ воздух/роговица и роговица/влага передней камеры свиного глазного яблока *ex vivo*.

Цель данной работы заключается в создании вариаций разработанного метода: 1) двухлучевой точечной триангуляции (схема измерений на рис. 2), которая позволит проводить упрощенные вычисления толщины и калибровку масштаба (на рис. 3 показаны триангулограммы для лучей 650 и 532 нм); 2) одно- и двухлучевой линейчатой триангуляции, которая позволит производить сканирование и, соответственно, измерения в области конечных размеров. Пример линейчатой триангулограммы для

лазерных линий 650 и 532 нм показан на рис. 4. Далее полученные триангулограммы будут обрабатываться как в работах [3, 4].



Рис. 1. Фото лазерных меток однолучевого метода триангуляции на роговице свинога глаза *ex vivo*

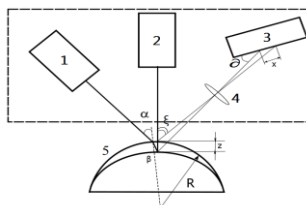


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1, 2 - лазеры, 3 - ПЗС-камера, 4 - линзы, 5 - роговица



а



б

Рис. 3. Фото световых меток при сведении лучей на второй границе (а), на первой границе (б)

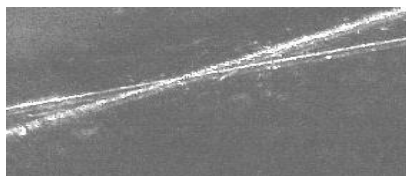


Рис. 4. Фото световых меток на фантоме роговице при использовании лазерных линий

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-42-343003 и гранта УМНИК 17-12 (б), Волгоградская область – 2017 № 12926ГУ/2018

Список литературы

1. Khramov V.N., Adamov A.A. Modification of the laser triangulation method for measuring the thickness of optical layers // Proc. SPIE. 2018, V. 10717. P. 1071703.
2. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н., и др. Лазерный триангуляционный измеритель толщины роговицы и остаточных роговичных слоев глаза. Патент на полезную модель №179826 // Бюл. № 15. Оpubл. 24.05.2018.
3. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. и др. Повышение разрешения световых меток при измерении толщины роговичного слоя глаза в методе лазерной триангуляции // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов. Москва, 2018. С. 542-543.
4. Адамов А.А., Баранов М.С., Храмов В.Н. и др. Модифицированный метод лазерной триангуляции // Тезисы докладов международной конференции Физика. Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. С. 123-124.

Ш.М. ИСМАИЛОВ^{1,2}, В.Г. КАМЕНЕВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ЭФФЕКТА КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

В данной статье представлены результаты исследования когерентного обратного рассеяния (КОР) от дисперсных сред, описан ряд разработок, направленных на оптимизацию аппаратуры для регистрации КОР в статических и динамических случайно-неоднородных средах. Была разработана четырехканальная система регистрации КОР с перестраиваемой динамической кюветой. 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)

²N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

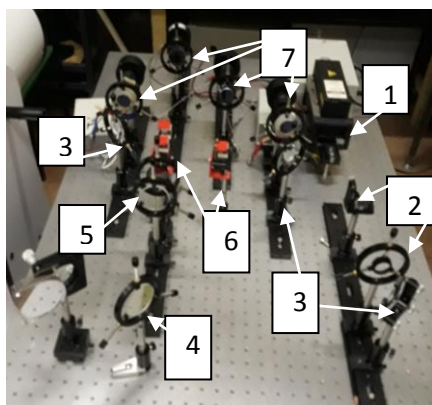
FOUR-CHANNEL SYSTEM FOR RECORDING THE COHERENT BACKSCATTERING EFFECT OF DISPERSED MEDIA

The article presents the results of coherent backscattering (CBS) of dispersed media, describes a number of developments aimed at optimizing the equipment for registering the CBS in static and dynamic randomly inhomogeneous media. A four-channel system for recording the CBS with a tunable dynamic cell was developed. New scientific data on the profiles of the CBS of randomly inhomogeneous media were obtained.

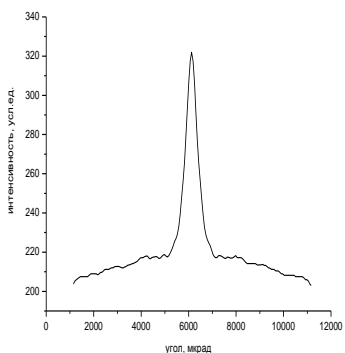
В настоящее время изучение распространения и рассеяния света в случайно-неоднородных средах является актуальной научной задачей. Когерентный луч, проходя через такую среду, в общем случае теряет свойства когерентности вследствие процессов многократного рассеяния. Однако, несмотря на данный фактор, приводящий к случайному изменению фазы волны, существует ряд эффектов, в которых проявляются когерентность и интерференционные свойства излучения. Наиболее известный и активно изучаемый из данных эффектов – когерентное обратное рассеяние [1].

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. Результаты измерений профиля когерентного обратного рассеяния от пылевого облака могут позволить решить задачу определения коэффициента рассеяния дисперсной среды и характерных размеров неоднородностей среды [2].

Была разработана и собрана четырехканальная система регистрации КОР с узлом синхронизации регистраторов, позволяющая регистрировать сигнал КОР одновременно с четырех каналов (рис. 1а).



а



б

Рис. 1. Схема установки и анализ полученных данных - принципиальная оптическая схема установки: 1 - лазер; 2 - телескоп; 3 - зеркало; 4 - полупрозрачное зеркало; 5 - система линз; 6 - делительный куб; 7 - регистратор (а); профиль КОР от частиц корунда Al_2O_3 диаметром 9 мкм с концентрацией 740 мг/см³ (б)

Эксперименты проводились на клиновидном образце рыхлой среды 740 мг/см³. Кадры, полученные с каждого канала регистрации складывались. При сложении кадров выявились постоянные составляющие помехового сигнала. Аксиальное усреднение приводит к их устранению. После аксиального усреднения строился профиль когерентного обратного рассеяния (рис. 1б).

Список литературы

1. Кузьмин В.Л., Романов В.П. // УФН. 1996. Т. 166. № 3.
2. Куратов С.Е., Кондратьев А.Н., Рогожкин Д.Б. // НТО №70/34Т. ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». 2016.

Н.В. ШОСТКА, О.С. КАРАКЧИЕВА, Б.В. СОКОЛЕНКО,
В.И. ШОСТКА

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК

В представленной работе проанализированы основные механизмы формирования массивов сингулярных пучков с неоднородной поляризацией с целью захвата и управления частицами. За последние несколько лет был опубликован ряд работ по захвату и переносу поглощающих свет частиц в воздухе. Было продемонстрировано, что для захвата большого числа микрочастиц может быть использован массив оптических ловушек. Поляризация света также может оказать влияние на качество захвата, поэтому возможность управления поляризационными состояниями оптических пучков дает дополнительную степень свободы в осуществлении манипуляций по перемещению захваченных частиц в пространстве, что позволит более аккуратно осуществлять контролируемое изменение положений захваченных частиц в массиве.

N. V. SHOSTKA, O. S. KARAKCHIEVA, B. V. SOKOLENKO,
V. I. SHOSTKA

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

FORMATION OF THE OPTICAL TRAPS SYSTEM

The basic mechanisms of formation of singular beams arrays with non-uniform polarization for the purpose of capture and control of particles are considered. Over the past few years a number of papers on the capture and transfer of light-absorbing particles in air have been published. It has been demonstrated that an array of optical traps can be used to capture a large number of microparticles. Polarization of light can also affect the quality of capture, so the ability to control the polarization states of optical beams provides an additional degree of freedom in manipulating the trapped particles in space, which will allow a more controlled change in the positions of trapped particles in the array.

Оптические ловушки, созданные на основе сингулярных пучков, позволяют захватывать живые клетки и микроорганизмы для их дальнейшего изучения с помощью оптической микроскопии.

Дело в том, что оптические ловушки на основе сингулярных пучков обладают важными практическими характеристиками, такими как сохранение минимумам интенсивности на оси пучка, что позволяет избежать нежелательного перегрева захваченного объекта, а также

удержать объект в поперечных координатах [1]. С другой стороны, во многих практических целях необходимо ограничивать трансляции захваченного объекта и в продольном направлении, что может быть достигнуто за счет использования в качестве ловушки пучков, у которых в области перетяжки существует изолированный минимум, равномерно окруженный зоной высокой интенсивности по трем пространственным координатам [2, 3].

Целью представленной работы является разработка метода захвата набора микрочастиц и живых микроорганизмов, а также контролируемого управления изменения их положений в режиме реального времени.

Результаты разработки данного метода захвата микрообъектов в совокупности с применением метода экспресс-анализа и отображения сложных поверхностей захваченных объектов различной природы неразрушающим бесконтактным способом вихревой микроскопии высокого разрешения дадут толчок в исследованиях биологии, медицины, вирусологии.

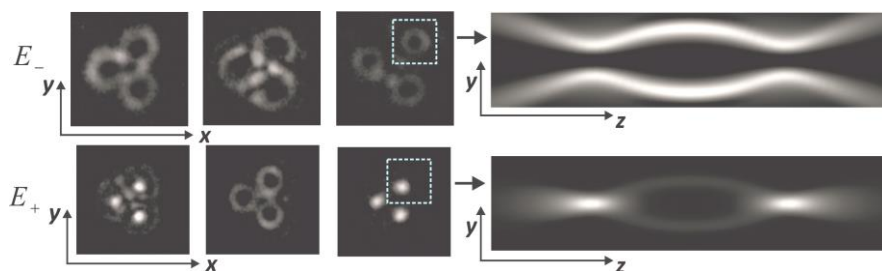


Рис. 1. Пример осуществления поляризационной фильтрации в системе сформированных $N = 3$ ловушек

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и гранта Правительства региона РФ № 17-42-92020 и частично поддержана Программой развития Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского на 2015-2024 годы.

Список литературы

1. Shvedov V.G., Davoyan A.R., Hnatovsky C., Engheta N., Krolikowski W. // Nature Photonics. 2014. V. 242. P. 1-5.
2. Arlt J., Padgett M.J. // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 191-193.
3. Bokor N., Davidson N. // Opt. Commun. 2007. V. 279. P. 229-234.

К.В. ЕФИМОВА^{1,2}, С.А. КИШКИН¹, С.П. КОТОВА¹,
Д.В. ПРОКОПОВА^{1,2}

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

²Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА И ФОРМИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА

Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий рассчитывать и формировать спиральные пучки с распределением интенсивности в форме заданной плоской кривой. Программное обеспечение позволяет вычислять комплексные амплитуды спиральных пучков и рассчитывать их голограммы. Формирование пучков осуществляется с помощью ЖК ПВМС.

K. V. EFIMOVA^{1,2}, S. A. KISHKIN², S. P. KOTOVA²,
D. V. PROKOPOVA^{1,2}

¹Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

²Samara National Research University

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR CALCULATION AND FORMATION OF SPIRAL BEAMS OF LIGHT

The hardware-software complex has been developed that allows calculating and forming spiral beams with an intensity distribution in the form of a given flat curve. The software allows us to calculate the complex amplitudes of the spiral beams and their holograms. The formation of beams is carried out using a LC SLM.

Спиральные пучки – это световые поля, сохраняющие заданную структуру распределения интенсивности при фокусировке и распространении с точностью до масштаба и поворота [1]. В работе [2] было найдено аналитическое выражение, позволяющее построить комплексную амплитуду спирального пучка с интенсивностью в виде произвольной плоской кривой $z(t)$.

$$S(z, \bar{z} | \zeta(t), t \in [0, T]) = \exp\left\{\frac{-z\bar{z}}{\rho^2}\right\} f(z) = \exp\left\{\frac{-z\bar{z}}{\rho^2}\right\} \times$$

$$\times \int_0^T \exp\left\{-\frac{\zeta(t)\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{2z\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \int_0^t [\bar{\zeta}(\tau)\zeta'(\tau) - \zeta(\tau)\bar{\zeta}'(\tau)] d\tau\right\} |\zeta'(t)| dt, \quad (1)$$

где ρ – гауссов параметр пучка, штрих означает производную по переменной t , а черта означает комплексное сопряжение. Интеграл (1), в

общем случае, для произвольной кривой – не берется в элементарных функциях. В нашем комплексе код позволяет рассчитать комплексную амплитуду спирального пучка по кривой, заданной в аналоговой или цифровой форме. На рис. 1 приведены результаты численного взятия интеграла (1) для заданной кривой в форме границы самолета с помощью разработанного программного обеспечения.

Рассчитанные голограммы спиральных пучков [3] формировались при помощи жидкокристаллического пространственно временного модулятора света ЖК ПВМС HOLOEYE 1080P (размеры активной зоны: 15,36 x 8,64 мм; количество управляемых элементов: 1920 x 1080) и восстанавливались пучком твердотельного лазера ($\lambda = 532$ нм, $P_{\max} = 50$ мВ), расширенным при помощи коллиматора (рис. 2). На рис. 3 показаны результаты восстановления голограммы спирального пучка в виде самолета, которые были зарегистрированы с помощью фотоприемного устройства (ФПУ). Видно, что изображение спирального пучка масштабируется и совершает поворот.



Рис. 1. Порождающая кривая, интенсивность и фаза спирального пучка

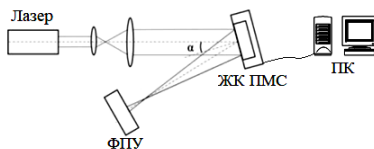


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

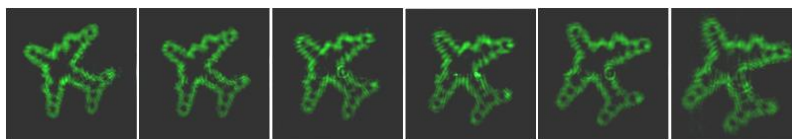


Рис. 3. Полученные распределения интенсивности спирального пучка в виде самолета, расстояние между соседними плоскостями 2 см

Комплекс позволяет формировать спиральные пучки по заданной пользователем кривой в реальном времени.

Список литературы

1. Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams: optical and quantum aspects // Optics Communications. 1996. V. 125. № 4. P. 302-323.
2. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит, 2010.
3. Афанасьев К.Н., Кишкин С.А. Формирование спиральных пучков при помощи фазовых голограмм // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4. С. 184-188.

И.Н. АБРОСИМОВ, Е.А. АНДРУЩАК, В.В. КУЗНЕЦОВ
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ СОВМЕСТИМЫЕ С ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ В АКТИВНОЙ ОПТИКЕ

Рассмотрено взаимодействие непрерывного оптического излучения с модулирующими сигналами, имеющими цилиндрическое пространственное распределение. Рассмотрены волновые процессы, позволяющие реализовать преобразования активной оптики нулевого и второго порядков с минимальными уровнями пространственных и временных искажений. Это обусловлено применением производящих цилиндрических функций, обеспечивающих фильтрацию высших гармоник модулированных сигналов.

I.N. ABROSIMOV, E.A. ANDRUSHAK, V.V. KUZNETSOV
MIREA – Russian Technological University, Moscow

WAVE PROCESSES COMPATIBLE WITH TRANSFORMATIONS IN ACTIVE OPTICS

Authors considered interaction of continuous optical radiation with modulating signals, which have cylindrical spatial distribution. Authors considered radiation processes. That processes allow realizing active optics conversion zero and first methods with minimal levels of spatial and temporal distortion. This is due to the application of producing cylindrical functions, which provide filtering higher harmonics of signals.

Работа посвящена взаимодействию непрерывного оптического излучения с модулирующими сигналами, которые оснащают оптические сигналы информационными свойствами. Эти свойства заложены в модулированном оптическом излучении, которыми могут быть волновой фронт, поляризация, амплитудные и частотно-временные параметры излучения. Модуляция может осуществляется механическими, пьезоэлектрическими, акустическими и другими устройствами. Важным требование является эффективность модуляции в которой учитывается глубина или динамические пределы изменения сигнала и уровень искажений, сопровождающих модуляцию. Оптимальным подходом является согласование элементов, участвующих в процессе модуляции.

Таковыми элементами является упругая среда или физический объект, а также оптическое излучение и модулирующий сигнал. Согласование может быть основано на использовании принципа суперпозиций

элементов симметрии, которыми характеризуются свойства упругой среды и физических воздействий. Модулированный оптический сигнал с цилиндрическим распределением описывается функцией следующего вида $\sin\{A\sin\omega_n t \cdot J_n(k_n r)\}$, где A – амплитуда колебаний, ω_n – резонансные частоты, k_n – волновые числа, r – координата, J_n – функция Бесселя первого рода n -го порядка. Пространственное распределение модулирующих сигналов в коаксиальном и сплошном цилиндрических резонаторах приведены на рис. 1а и 1б.



Рис. 1. Распределение модулированного оптического излучения в коаксиальном и сплошном цилиндрических резонаторах: сигнал осуществляющий осесимметричную модуляцию волнового фронта второго порядка (а), осесимметричное распределение акустических колебаний в коаксиальном резонаторе, осуществляющего динамическое центрирование вала в приводах линейного перемещения (б)

При отсутствии динамического центрирования вала возникают радиальные биения, сопровождающие паразитными перемещениями вала. В оптических юстировочных устройствах это приводит к искажениям волнового фронта. При отсутствии центрирования, такая ситуация возникает в пьезоэлектрическом приводе типа, «гусеница», который изображен на рис. 2.

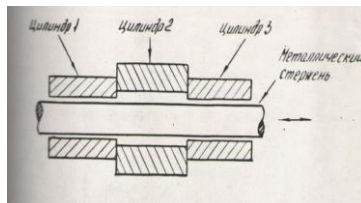


Рис. 2. Пьезопривод типа «гусеницы»

Список литературы

1. Абросимов И.Н. Способ преобразования электромагнитного излучения. Авторское свидетельство SU 1577547.

О.В. ПЕЧИНСКАЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТЕРА ШАЙМПФЛЮГА В ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Предложен критерий оценки эффективности применения адаптера Шаймпфлюга в оптических измерительных системах с наклоном объектива или матрицы относительно оптической оси на основе данных об изменении размера кружка рассеяния, даваемого оптической системой, при изменении угла наблюдения и расстояния наведения. Представлены результаты моделирования измерительной ветви стереосистемы с наклоном матрицы относительно оптической оси объектива. Установлено, как изменяется эффективность применения адаптера Шаймпфлюга при изменении расстояния наведения и угла наблюдения.

O.V. PECHINSKAYA

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

EFFECTIVENESS ESTIMATE OF THE USE SCHEIMPFLUG ADAPTER IN OPTICAL MEASURING SYSTEMS

A criterion for evaluating the effectiveness of the Scheimpflug adapter in optical measuring systems with a tilt of the lens or matrix relative to the optical axis based on the data on the change in the size of the scattering circle, given by the optical system, with a change in the viewing angle and the guidance distance is proposed. The results of modeling the measuring branch of the stereo system with the slope of the matrix relative to the optical axis of the lens are presented. Established how the effectiveness of Scheimpflug adapter when the guidance distance and viewing angle are changed.

Адаптеры Шаймпфлюга применяются в оптических измерительных системах, в тех случаях, когда требуется стереосъёмка или конструктивно невозможно разместить аппаратуру таким образом, чтобы оптическая ось измерительной системы была ортогональна плоскости наведения [1, 2].

Целью работы является установление зависимости эффективности применения адаптера Шаймпфлюга от расстояния наведения и угла наблюдения в схеме с наклоном матрицы.

Моделирование выполнялось в пакете прикладных программ Zemax. Основные параметры модели измерительной ветви комплекса 2D-PIV (Stereo-PIV) (рис. 1): фокусное расстояние объектива 35 мм, расстояние

наведения изменялось в диапазоне от 10-ти до 30-ти фокусных расстояний с шагом $5f'$, диапазон изменения угла наблюдения $5^\circ - 60^\circ$ с шагом 5° .

Для моделирования был рассмотрен случай поворота видеокамеры на угол α , который, в соответствии с принципом Шаймпфлюга, определяется исходя из геометрических соображений $\operatorname{tg}\alpha = (f'/A)\operatorname{tg}\theta$, здесь A – расстояние наведения, θ – угол наблюдения.

Были получены диаграммы кружков рассеяния для всех комбинаций расстояний наведения и угла наблюдения в случае коррекции изображения ($\theta \neq 0^\circ$, $\alpha = \alpha(\theta)$) и в случае, когда плоскость матрицы перпендикулярна оптической оси системы ($\theta \neq 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$), т.е. изображение не было скорректировано.

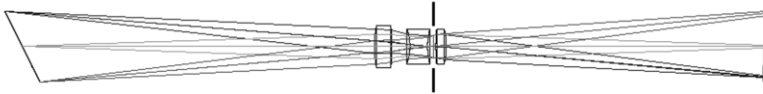


Рис. 1. Схема измерительной ветви

Для количественной оценки эффективности применения адаптера Шаймпфлюга предложен критерий, который, по сути, является мерой «скорректированности» изображения $\eta = (\sigma R_0 - \sigma R) / \sigma R_0$, где σR_0 – СКЗ по полю зрения разности радиусов пятна рассеяния для нескорректированного и нормального изображений; σR – СКЗ по полю зрения разности радиусов пятна рассеяния для скорректированного и нормального изображений. При отсутствии коррекции $\sigma R_0 = \sigma R$ и $\eta = 0$; при полной коррекции $\sigma R = 0$ и $\eta = 1$. На рис. 2 представлены зависимости $\eta(\theta)$ для различных расстояний наведения. Эффективность нелинейно возрастает с увеличением расстояния наведения и незначительно снижается при больших углах наблюдения.

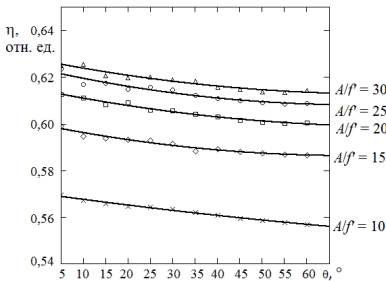


Рис. 2. Графики зависимости $\eta(\theta)$

Список литературы

1. Описание измерительных комплексов 2D-PIV и Stereo-PIV компании LaVision. Режим доступа: <http://www.lavision.de/en/techniques/piv-ptv/>. Дата обращения: 10.11.2018.
2. Руководство пользователя программы «ActualFlow». Версия 1.16. Режим доступа: <http://www.itp.nsc.ru/piv/>. Дата обращения: 10.11.2018.

В.И. БУСУРИН, М.А. ЖЕГЛОВ¹, К.А. КОРОБКОВ, Р.П. БУЛЫЧЕВ

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

¹*АО «ГосНИИП», Москва*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА «ГРУБО-ТОЧНОЙ» ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ УСКОРЕНИЙ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

Разработана структура преобразователя ускорений с оптическим считыванием и контуром стабилизации чувствительного элемента. Предложен метод «грубо-точной» обработки информации. Разработан макет для экспериментальной проверки работоспособности датчика ускорений с оптическим считыванием и проведено моделирование.

V.I. BUSURIN, M.A. ZHEGLOV¹, K.A. KOROBKOV, R.P. BULYCHEV

Moscow Aviation Institute (National Research University)

¹*JSC «GosNIIP», Moscow*

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF «ROUGHLY-ACCURATE» INFORMATION PROCESSING IN THE ACCELERATED CONVERTER WITH OPTICAL READING

The structure of the converter of accelerations with optical reading and the stabilization circuit of the sensitive element has been developed. A method of «roughly-accurate» information processing is proposed. A model for experimental efficiency verification of the acceleration sensor with optical reading was developed and modeling was carried out.

В настоящее время во многих прикладных задачах востребовано измерение ускорений: при построении бесплатформенных инерциальных навигационных систем, для стабилизации оси резонатора твердотельного волнового гироскопа и др. Предложено использовать преобразователь линейных ускорений на основе измерения изгибных микродеформаций оптической пластины с помощью оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [1] и интерферометрическим методом. ОТЭ позволяет измерять субмикронные перемещения порядка длины волны излучения. При помощи интерферометрического метода измеряются большие перемещения.

Оптический преобразователь ускорений построен по дифференциальной схеме, в которой полезным сигналом является оптическая мощность инфракрасного излучателя, переходящая из чувствительного элемента (ЧЭ) в виде плоскопараллельной пластины, подвергаемой изгибной деформации, в цилиндрический элемент, на котором закреплён фотоприёмник. Для расширения диапазона измерений и предотвращения механического контакта ЧЭ с элементами конструкции предлагается ввести дополнительный контур стабилизации, с постоянными магнитами, закреплёнными на ЧЭ, и электромагнитными катушками, расположенными на корпусе, сигналы на которые подаёт электронный блок формирования компенсационных воздействий. Контур стабилизации ЧЭ преобразователя ускорения является следящей системой управления и в зависимости от деформации ЧЭ возвращает его в первоначальное положение при помощи электромагнитных воздействий. Для увеличения точности измерений и быстродействия предложено использовать метод «грубо-точной» обработки информации, дополнив систему парой интерферометрических датчиков, расположенных ближе к краю ЧЭ, относительно точек съёма на ОТЭ.

Разработаны структурная и функциональная схемы первичного преобразователя линейных ускорений на ОТЭ, с интерферометрическим съёмом и контуром стабилизации. Составлена математическая модель преобразователя ускорений, учитывающая инерционные свойства ЧЭ. Проведено исследование динамики системы. Построены временные диаграммы изменения напряжения на электронном блоке обработки информации с датчиков перемещений на ОТЭ и виды деформаций средней линии пластины во времени при различных видах изменения ускорения. Разработана трёхмерная модель ЧЭ и промоделированы виды деформаций при влиянии различных комбинаций воздействующих сил. Предложен алгоритм стабилизации ЧЭ при помощи пары электромагнитных сил. Разработана трёхмерная модель корпуса для макета. Предложена схема для приёма и первичной обработки сигнала с оптических датчиков. Проведено полунатурное моделирование, получены экспериментальные данные о влиянии внешних факторов на качество передачи мощности оптического сигнала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Busurin V.I., Korobkov V.V., Naing Htoo Lwin, Phan Anh Tuan Static and dynamic characteristics of angular velocity and acceleration transducers based on optical tunneling effect // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737. P.1-7.

Д.Г. ДЕНИСОВ, А.Б. МОРОЗОВ¹

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Лыткаринский завод оптического стекла, Московская обл.*

СПЕЦИФИКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ НАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ В ЗАДАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ ПРОФИЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассматривается актуальная научно-техническая проблема в современных оптических технологиях – разработка методики высокоточного контроля поверхностных неоднородностей крупногабаритных лазерных деталей нанометрового уровня. Предложенная методика, позволяет оценить погрешности аппаратуры контрольно-измерительного стенда, алгоритмические составляющие структуры общей погрешности контроля, а так же погрешности изготовления детали в широком спектральном диапазоне пространственных неоднородностей на основе расчёта и анализа одномерной спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ1 от англ. PSD – Power Spectral Density).

D.G. DENISOV, A.B. MOROZOV¹

*Bauman Moscow State Technical University
¹Lytkarino Optical Glass Factory, Moscow region*

FEATURE OF METHOD FOR DETERMINING LOCAL DEFLECTIONS OF NANOMETER LEVEL IN THE SETTINGS SPATIAL-FREQUENCY PROFILE RANGE OF OPTICAL SURFACES

The topical scientific technical problem in modern optical technologies - development of methods of high-precision control of surface irregularities bulky laser components subnanometer level. The proposed method makes it possible to evaluate the error control equipment measuring stand, algorithmic components of the overall structure of the control error, as well as parts of manufacturing errors in a wide spectral range of spatial inhomogeneities on the basis of the calculation and analysis of one-dimensional power spectral density (PSD – 1D).

В настоящее время одной из актуальных научно-технических задач в области оптических материалов и технологий современной оптической промышленности является задача создания перспективных крупногабаритных оптических и лазерных активных элементов с

высокими показателями качества поверхностных неоднородностей изготавливаемых профилей [1-3]. Данный класс изделий применяется в лазерных технологических комплексах с целью получения высоких энергий для реализации термоядерного синтеза. Стоит отметить, что обеспечение высоких эксплуатационных показателей таких изделий достигается как за счёт современных технологических методов формообразования, так и благодаря оперативному межоперационному контролю. Наличие мелкомасштабных неоднородностей, как на поверхности, так и в структуре оптического материала может привести к самофокусировке лазерного излучения и как следствие к разрушению материала при проходе столь мощного лазерного пучка. В этой связи научно-технические задачи, посвящённые аттестационной диагностики неоднородностей материалов и профилей поверхностей лазерных изделий нанометрового уровня являются актуальными, а разработка методик высокоточного контроля при проектировании полноапертурного (до 1 метра) контрольно-измерительного оборудования важным этапом создания комплекса цеховой аппаратуры метрологического обеспечения принципиально нового поколения. Представленная методика аттестации статистических показателей качества исследуемых профилей крупногабаритных лазерных деталей на основе анализа СПКФ1 позволяет оценивать влияние отдалённо взятых поверхностных неоднородностей на результирующую погрешность эффективной шероховатости, что обеспечивает высокую чувствительность и точность диагностики высотных параметров профилей нанометрового уровня.

В результате проведенных исследований анализируются инструментальные и методические погрешности обусловленные как спецификой методики регистрации карты волнового фронта так и особенностью разработанного алгоритма фильтрации целевой функции – СПКФ1 в заданных пространственно-частотных диапазонах.

Список литературы

1. Campbell J.H., Hawley-Fedder R.A., Stolz C.J., Menapace J.A., Borden M.R., Whitman P.K., Tu J., Riley M.O., Feit M.D., Hackel R.P. NIF Optical Materials and Fabrication Technologies: An Overview // Proc. SPIE. 2004. V. 5341. P. 84-101.

2. Денисов Д.Г. Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

3. Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Гладышева Я.В., Морозов А.Б., Патрикеев В.Е. Метод аттестационного контроля поверхностных неоднородностей оптических деталей на основе частотного анализа профиля поверхности // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 15-19.

С.Н. БАЗЫКИН, Н.А. БАЗЫКИНА, К.С. САМОХИНА

Пензенский государственный университет

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается оптико-электронная схема для измерения линейных перемещений объектов с пространственными реперными точками, расположенными по трассе измерения. Показано, что восстановление информации о перемещении по реперным точкам, организованным по трассе измерения, позволило существенно повысить помехоустойчивость результатов измерения.

S.N. BAZYKIN, N.A. BAZYKINA, K.S. SAMOKHINA

Penza state university

OPTO-ELECTRONIC DEVICE FOR MEASURING LINEAR DISPLACEMENTS OF OBJECTS

An optoelectronic scheme for measuring linear movements of objects with spatial reference points located along the measurement path is considered. It is shown that the recovery of information about the movement of reference points, organized along the measurement route, has significantly improved the noise immunity of the measurement results.

Метрологические требования контроля автоматизированного оборудования обнаруживают тенденцию к увеличению числа параметров контроля, что приводит к созданию управляющих систем, качество которых во многом зависит от функциональных возможностей и точностных характеристик входящих в их состав измерительных систем. Наиболее полно удовлетворяющие этим требованиям являются измерительные системы, работающие на принципах гетеродинной лазерной интерферометрии [1, 2, 4].

Для повышения помехоустойчивости измерительных сигналов необходима система с реперными точками, организованными по трассе измерения перемещений, по которым бы возможно было восстановление информации о перемещении [3, 5].

Схема лазерной измерительной системы с организованными по трассе измерения пространственными реперными метками представлена на рис. 1. Излучение лазера I направляют на акустооптический блок формирования разночастотных лазерных пучков, состоящий из

акустооптического модулятора 2 и оптической системы линз 3. Разночастотные оптические пучки направляют соответственно: “+1” – на

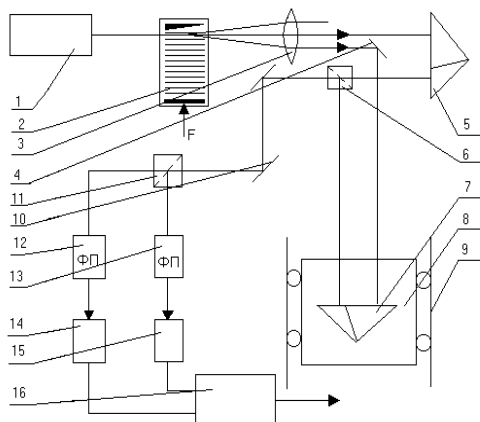


Рис. 1. Схема лазерной измерительной системы

неподвижный уголкового отражатель 5; “0” – на уголкового отражатель 7, установленный на каретке 8, имеющей возможность перемещаться по направляющим 9.

Затем оптические пучки интерферируют на светоделительной грани оптического куба 6 и через поворотное зеркало 10 поступают на поляризационный куб 11. В результате разделения этого сигнала по поляризации на кубе 11 происходит также его разделение и по частоте.

На фотоприемник 12 поступает оптический сигнал на спектральной составляющей λ_1 , а на фотоприемник 13 – сигнал с длиной волны λ_2 . Схемы формирования измерительных импульсов 14, 15 и 16 выделяют узкие импульсы, соответствующие переходам через реперные метки.

Таким образом, представленная в статье схема позволила существенно повысить помехоустойчивость результатов измерения.

Список литературы

1. Bazykin S.N., Bazykina N.A., Samohina K.S. Problems of systems dataware using optoelectronic measuring means of linear displacement // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science IPDME, 2017.
2. Базыкин С.Н., Базыкина Н.А., Кривулин Н.П. Принципы построения и состояние производства информационно-измерительных систем линейных перемещений // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1.
3. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Санкт-Петербург: Лань, 2013.
4. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. Санкт-Петербург: Лань, 2013.
5. Якушечков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения. М.: Логос, 2013.

С.Л. ШНЫРЕВ, А.А. КОНДРАШОВ, А.А. ДОЛИН,
А.А. КОЛЕСНИЧЕНКО

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

Проведен анализ современной промышленно-экономической, научно-технической, нормативной, методической литературы, по итогу которого отмечена перспективность применения отдельных методов детектирования H_2S .

S.L. SHNYREV, A.A. KONDRASHOV, A.A. DOLIN,
A.A. KOLESNICHENKO

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

ANALYSIS OF MODERN METHODS AND MEANS OF SEROMETER-CONNECTING COMPOUNDS MONITORING

The analysis of modern industrial-economic, scientific-technical, regulatory and methodical literature was conducted, as a result of which prospects for using individual H_2S detection methods were noted.

Контроль концентрации сероводорода в воздушной среде является одной из важных задач по мониторингу концентрации вредных веществ в воздушной среде на различных объектах промышленности. Данная задача не может быть решена без проведения анализа современной промышленно-экономической, научно-технической, нормативной, методической литературы с целью выбора перспективного метода обнаружения сероводорода в воздухе рабочих зон промышленных предприятий.

Целью работы является выбор типа детектора с характеристиками, удовлетворяющими требованиям мониторинга концентрации сероводорода в воздухе рабочих зон: обеспечение необходимой чувствительности в сочетании с возможностью эксплуатации в автоматизированных системах. Для решения такой задачи необходимо рассмотреть основные приборы, методы и средства контроля сероводорода в газовых средах, существующие в настоящее время, и показать, что проблема такого контроля не является полностью решенной.

Проведенный анализ показал, что методы и средства контроля серосодержащих соединений можно разделить на три основные группы – химико-аналитические, инструментальные и сенсорные методы контроля [1]:

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДА

Химико-аналитические	Инструментальные	Сенсорные
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Флуоресцентный (флуориметрический) ▪ Линейно-колористический ▪ Каталитический ▪ Отбор проб на пленочный сорбент ▪ Отбор проб в барботёре ▪ Колориметрический <ul style="list-style-type: none"> ➢ применение жидких поглотителей, реагентов ➢ метод индикаторных трубок ➢ реактивная бумага 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Хроматографический ▪ Масс-спектрометрический ▪ Электрохимический <ul style="list-style-type: none"> ➢ Кондуктометрический ➢ Потенциометрический ➢ Кулонометрический ▪ <u>Оптический</u> <ul style="list-style-type: none"> ➢ ИК и УФ ➢ Фотоколориметрический ➢ Кулонометрический 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Электрохимические ▪ Термохимические (термокаталитические) ▪ Полупроводниковые ▪ Масс-чувствительные ▪ Оптические <ul style="list-style-type: none"> ➢ Опволоконные ➢ Волноводные ➢ Интегрально-оптические

Основным достоинством классических химико-аналитических методов анализа являются простота выполнения и высокая точность измерения. К недостаткам относятся продолжительность анализа, а также невозможность автоматизации систем.

Достоинством инструментального метода является высокая чувствительность и селективность проведения измерений. Инструментальными методами можно определять составные компоненты непосредственно в анализируемых смесях без их разделения и без выделения отдельных компонентов. Следует отметить также быстроту выполнения анализа, возможность автоматизации и компьютеризации. К недостаткам относится сложность используемой аппаратуры и ее высокая стоимость.

Преимуществом сенсорного метода является низкая стоимость, малые габариты, возможность измерений в реальном масштабе времени. Но, несмотря на ряд достоинств, оказывается практически невозможным формирование селективного сенсора, который имеет отклик только к одному газу [1].

Таким образом, проведенный анализ существующих методов детектирования сероводорода показал, что наиболее перспективным как с точки зрения высокой чувствительности, так и возможности проведения измерений в реальном времени с помощью автоматизированных систем, является инструментальный оптический метод.

Список литературы

1. Кечкина Н.И. // Оптический химический сенсор для мониторинга сероводорода в воздухе. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Москва, 2017.

А.В. ПОЛЯКОВ, Д.Г. САХОНЧИК
Белорусский государственный университет, Минск

АНАЛИЗ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЕРИОДА РЕЦИРКУЛЯЦИИ В ЗАМКНУТЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМАХ

С помощью метода многоканального временного анализа проведены экспериментальные исследования кратковременных флуктуаций периода рециркуляции в замкнутой волоконно-оптической системе, предназначенной для подземной охраны периметра. Выявлены режимы работы элементов оптоэлектронного контура, обеспечивающие уменьшение среднеквадратичных значений данных флуктуаций более чем в два раза.

A. V. POLYAKOV, D. G. SAKHONCHIK
Belarusian State University, Minsk

ANALYSIS OF THE RECIRCULATION PERIOD SHORT-TERM FLUCTUATIONS IN CLOSED FIBER OPTICAL SYSTEMS

Using the method of multichannel time analysis, experimental studies of short-term fluctuations of the recirculation period in a closed fiber-optical system intended for underground protection of the perimeter were carried out. The operation conditions of the optoelectronic circuit elements, providing a reduction of the mean-square values of these fluctuations by more than two times were identified.

В последнее время внимание фирм-производителей, специализирующихся на системах охраны, все больше обращается к волоконно-оптическим системам охраны периметра (ВОСОП). Интерес к таким устройствам обусловлен их невосприимчивостью к воздействию электромагнитных и радиочастотных помех, а также грозовых разрядов, что уменьшает вероятность ложной тревоги; сенсорные кабели не излучают электромагнитного поля и их трудно обнаружить с помощью поисковой техники; возможностью использовать эти датчики на взрывоопасных объектах или под водой, а также защита объектов с протяженными периметрами, со сложной электромагнитной обстановкой. В [1, 2] предложена структура подземной ВОСОП рециркуляционного типа с использованием WDM-технологии спектрального уплотнения информационных каналов. Принцип действия основан на регистрации изменений периода рециркуляции, возникающих за счет дополнительных

потерь мощности циркулирующих оптических импульсов при деформациях волоконного световода под воздействием идущего или ползущего нарушителя [3].

Одним из фундаментальных факторов, определяющим разрушающую способность датчика, являются кратковременные флуктуации периода рециркуляции. Рассматриваемые временные флуктуации в волоконно-оптической сигнальной системе (ВОСС) являются результатом наложения целого ряда независимых друг от друга явлений. Наиболее существенное влияние на их структуру оказывают следующие факторы: временной джиттер в инжекционном лазере, возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; нестабильность времени отклика лавинного фотодиода; временной разброс моментов срабатывания порогового решающего устройства, который связан с изменением амплитуды входного сигнала и т.д. Сложный характер флуктуаций временных параметров требует разработки специальных экспериментальных методик изучения закономерностей распространения сигналов в замкнутой оптоэлектронной системе.

Для исследования флуктуаций времени распространения оптических импульсов по оптоэлектронному тракту с высоким временным разрешением был использован метод многоканального временного анализа [4], который основан на регистрации вероятностной структуры флуктуаций периодов импульсных процессов. Основным измерительным узлом установки являлся стенд для анализа флуктуаций временных интервалов с разрешением 20 пс, состоящий из блока селекции временных интервалов, преобразователя время-амплитуда, многоканального амплитудного анализатора. Анализ полученных результатов показал, что для каждого значения тока накачки лазера и коэффициента лавинного умножения ЛФД существует определенное значение порога срабатывания решающего устройства, обеспечивающее минимальные флуктуации периода рециркуляции в ВОСС. Выбор режимов работы элементов контура позволяет уменьшить кратковременные флуктуации более чем в 2 раза и достичь среднеквадратичных значений на уровне 70 пс.

Список литературы

1. Polyakov A.V. // Proc. SPIE, 2017. V. 10433. P.10433401.
2. Поляков А.В., Ксенофонтов М.А., Сахончик Д.Г. // I межд. науч.-техн. конф. «Опто-, микро- и СВЧ-электроника», 2018. С. 262.
3. Поляков А.В. // V межд. конф. по фотонике и информационной оптике, 2016. С. 412.
4. Поляков А.В. // Информатика. 2006. № 3. С. 122.

Е.А. ШАЧНЕВА, Т.И. МУРАШКИНА

Пензенский государственный университет

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТИ

Представлены основные особенности определения конструктивно-технологических параметров, которые необходимо учитывать при проектировании волоконно-оптического датчика параметров жидкостных сред с применением сильфона. Определены условия, предъявляемые к компонентам волоконно-оптического датчика.

E.A. SHACHNEVA, T.I. MURASHKINA

Penza State University

FEATURES OF DETERMINATION OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MECHANICAL CONVERSION OF FIBER OPTICAL SENSOR OF PARAMETERS OF LIQUID

The main features of the definition of structural and technological parameters that must be considered when designing a fiber-optic sensor of parameters of liquid media using a bellows are presented. The conditions imposed on the components of the fiber-optic sensor are determined.

В настоящее время существует множество способов и установок для воспроизведения и измерения расхода жидкости [1]. Но основными их недостатками являются сложность технической реализации и наличие "электрических" элементов в зоне возможного воздействия электромагнитных полей.

Целью работы является разработка и исследование волоконно-оптического датчика параметров жидкостных сред (скорости потока, объема, уровня), основным элементом которого является измерительный преобразователь угловых микроперемещений (ВОПУМП) [2], совмещенный с сильфонным преобразователем [3], конструктивно-технологические параметры которого влияют на вид функции преобразования датчика в целом.

Параметры функции преобразования выбираются из условий достижения максимальной линейности и высокой чувствительности преобразования оптических сигналов. По результатам математического моделирования [4] приняты следующие конструктивно-технологические параметры ВОПУМП: оптическое волокно, внешний диаметр которого $d_{\text{ВО}} = 500$ мкм, диаметр сердцевины $d_{\text{С}} = 200$ мкм, апертурный угол $\Theta_{\text{НА}} = 12^\circ$; тип жидкости – водно-солевой раствор, диапазон изменения объема жидкости – от 100 мл до 500 мл, особенности движения жидкости – отсутствие турбулентности; внешний диаметр датчика $R_{\text{ВОД}} = 45$ мм, а из условия $R_{\text{С}} \leq (0,8 \dots 1,0)R_{\text{ВОД}}$ выбирается сильфон с минимальным внешним радиусом $R_{\text{С}} = 10$ мм, количеством гофр $n = 3$, длиной 20 мм и толщиной стенки 0,12 мм [5]. При данных параметрах угол отклонения α воспринимающего элемента при силовом воздействии потока жидкости равен $0 \dots 3$ градуса, который обеспечивает достижение линейной функции преобразования.

Список литературы

1. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Shachneva E.A., Istomina T.V., Udalov A.Yu., Serebryakov D.I. Fluid Flow Measurement in Astronauts Life Support Systems // Biomedical Engineering. 2016. V. 49. № 5. P. 295-299.
2. Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г., Серебряков Д.И., Юрова О.В. Патент РФ 2419765. МПК G01 В 21/00. Волоконно-оптический преобразователь углового перемещения // Бюл. № 15. Оpubл. 27.05.2011.
3. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Юрова О.В., Серебряков Д.И., Удалов А.Ю., Серебряков К.Д., Шачнева Е.А. Метрологическое обеспечение испытаний волоконно-оптических преобразователей угловых микроперемещений // Биотехносфера. 2016. № 1 (43). С. 21-25.
4. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Истомина Т.В., Истомин В.В., Шачнева Е.А., Косенок Н.Ю. Методика моделирования волоконно-оптического датчика расхода и параметров жидкостных потоков системы жизнеобеспечения космонавтов // Медицинская техника. 2018. № 5. С. 31-34.
5. ГОСТ 21482 – 76. Сильфоны однослойные измерительные металлические.

О.Т. КАМЕНЕВ^{1,2}, Ю.С. ПЕТРОВ², В.А. КОЛЧИНСКИЙ²,
А.А. ПОДЛЕСНЫХ¹

¹*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

²*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

ИСПЫТАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДЕФОРМОМЕТРА С ПАССИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

Проведены экспериментальные исследования приема и обработки сейсмических сигналов на объекте техногенного происхождения. Замечена корреляция сигналов волоконно-оптического деформометра с пассивной стабилизацией рабочей точки и волоконно-оптического акселерометра с активной стабилизацией.

O.T. KAMENEV^{1,2}, Yu. S. PETROV², V.A. KOLCHINSKIY²
A.A. PODLESNYKH¹

¹*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

²*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

UNDEGROUND MINE TESTS OF FIBER STRAIN SENSOR WITH PASSIVE STABILISATION

Experimental test of receiving and demodulation of seismic signals in anthropogenic object are carried out. A correlation of passive stabilization fiber strain sensor and active stabilization fiber accelerometer seismic data are found out.

Волоконно-оптические интерферометрические датчики компактны, обладают высокой чувствительностью, способны длительное время устойчиво работать при неблагоприятных условиях. Их используют в гидроакустике, геофизике, для краткосрочного и долговременного наблюдения крупномасштабных структур, таких как высотные здания, мосты, плотины, туннели, шахты [1].

Высокая чувствительность волоконного интерферометра приводит к дрейфу его рабочей точки, вызванному изменениями условий окружающей среды, например, температуры и давления. Для решения этой проблемы применяются методы активной стабилизации, предусматривающие использование электрооптических фазовых модуляторов или пассивной стабилизации на основе оптических схем с разветвителем 3×3 [2].

В данной работе проведены экспериментальные исследования приема сейсмических сигналов в подземном руднике. Сопоставлены результаты испытаний волоконно-оптического деформометра с пассивной стабилизацией рабочей точки (рис. 1а,б) и волоконно-оптического акселерометра с активной стабилизацией (рис. 1в). Полученные данные с оптоволоконного деформометра обработаны при помощи алгоритма, описанного в работе [3].

На рис. 1 представлены зафиксированные датчиками сигналы длиной 30 минут при частоте дискретизации 1024 Гц. Наблюдается деформационный сдвиг пород (1) с последующей релаксацией (2) и, после выделения высокочастотной составляющей сигнала – сейсмические колебания от работы горной техники (3).

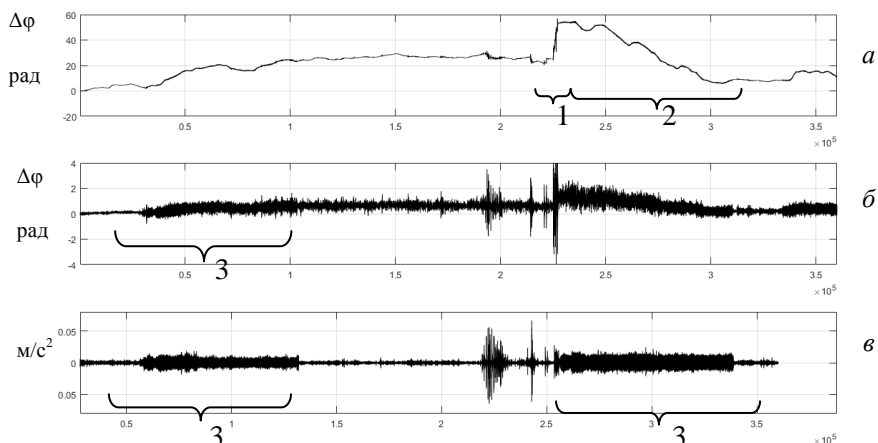


Рис. 1. Сигнал волоконно-оптического деформометра (а), сигнал деформометра, обработанный ФВЧ (б), сигнал волоконно-оптического акселерометра (в)

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-02082 и № 16-05-00750), а также грантом ДВО РАН (проект № 18-5-080)

Список литературы

1. Inaudi D., Elamarib A., Pflug L. // Sensors and Actuators A. 1994. V. 44. P. 125-130.
2. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т. и др. // Вестник ДВО РАН. 2016. № 4. С. 6-59.
3. Her S.-C., Yang C.-M. // Sensors. 2012. V. 12(3). P. 3314-3326.

В.Б. ПАРФЕНТЬЕВА^{1,2}, В.А. КАМЫНИН², А.И. ТРИКШЕВ²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Создана установка для измерения дисперсионных характеристик оптических волокон на основе интерферометра Майкельсона в волоконном исполнении. Приведены параметры системы и результаты экспериментов по получению интерференции при отражении излучения от торцов волокна в плечах интерферометра.

V.B. PARFENTYIEVA^{1,2}, V.A. KAMYININ², A.I. TRIKSHEV²

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

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

MEASUREMENT OF DISPERSION CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBERS BASED ON USING THE MICHELSON INTERFEROMETER

Created the installation for measuring the dispersion characteristics of optical fiber based on a fiber version of the Michelson interferometer. Presents the parameters of the system and the results of experiments of obtaining interference in the reflection of radiation from the ends of fiber in the arms of the interferometer.

Сегодня много внимания уделяется исследованию и развитию волоконных лазеров ультракоротких импульсов (УКИ), которые находят применения как в промышленности, так и в медицине. Одним из ключевых параметров лазеров УКИ является дисперсия резонатора, которая влияет не только на длительность импульсов, но и на режим генерации в целом. Для этого необходимо достаточно точно измерять дисперсионные характеристики элементов резонатора лазера.

Целью работы является создание системы на основе интерферометра Майкельсона для измерения дисперсии групповых скоростей в оптических волокнах [1, 2], исследование ее параметров, отработка метода измерения оптической разности хода с помощью перестраиваемой линии оптической задержки. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В качестве широкополосного источника

используется волоконный источник инфракрасного излучения с активной средой из композитного волокна легированного ионами Er^{3+} [3], накачка осуществляется диодным лазером на длине волны 976 нм. Поглощение активного волокна на длине волны 976 нм составляет 12 дБ/м, длина волокна 8 м. Ширина спектра излучения источника составляет 100 нм в диапазоне длин волн от 1500 нм до 1600 нм, что характерно для люминесценции эрбия. Плечо интерферометра с тестируемым волокном зафиксировано перед зеркалом, второе плечо включает рельсу, по которой перемещается закрепленный конец волокна, для грубой подстройки разности хода, а также линию оптической задержки для более точного изменения разности оптического хода излучения, минимальный шаг составляет 0,3 мм.

Для калибровки линии задержки установки проведен эксперимент по получению интерференционной картины при френелевском отражении излучения от торцов волокна. Путем подстройки линии задержки выставлена одинаковая длина плеч и интерференцию можно было наблюдать на оптическом спектральном анализаторе рис. 2.

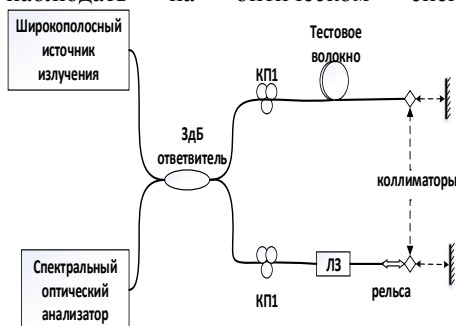


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

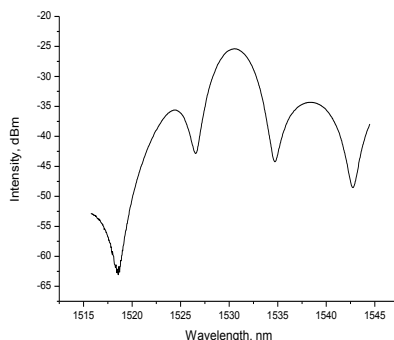


Рис. 2. Интерференция на ОСА

Таким образом создана и съюстирована установка для измерения дисперсионных характеристик волокон, отработана методика компенсации разности оптического хода излучения.

Список литературы

1. Ting Z., Zhi Y., et. al. // Chinese Optics Letters. 2010. V. 8 (3). P. 262-265.
2. Lee J.Y., Kim D.Y. // Optics Express. V .14 (24). P. 11608-11615.
3. Галаган Б.И., Денкер Б.И. и др. // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3(2). С. 146-157.

Е.И. МОСТОВАЯ, М.Б. БЕЛОНЕНКО
Волгоградский государственный университет

ТРЕХМЕРНЫЕ ЧИРПИРОВАННЫЕ СВЕТОВЫЕ ПУЛИ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ

Рассмотрена задача динамики распространения трехмерных чирпированных импульсов (световых пуль) в углеродных нанотрубках. Численно показано, что предполагаемый тип пучка демонстрирует устойчивое и стабильное распространение.

E.I. MOSTOVAYA, M.B. BELONENKO
Volgograd State University

THREE-DIMENSIONAL CHIRPED LIGHT BULLETS IN CARBON NANOTUBES

The problem of the dynamics of three-dimensional chirped pulses (light bullets) in carbon nanotubes is considered. It is shown numerically that the proposed type of beam demonstrates stable propagation.

Чирп оптического импульса обычно понимается как временная зависимость его мгновенной частоты. В частности, восходящий чирп (down-chirp) означает, что мгновенная частота увеличивается со временем.

Термин «чирп» иногда также используется в другом контексте, когда изменяется мгновенная временная или пространственная частота некоторых величин, отличных от электрического поля. Это может происходить, например, в волокнистых брэгговских решетках с аperiodическими решетками, где есть чирп периода решетки. То же самое относится и к другим видам зеркал [1, 2].

Исходя из выше сказанного была предложена трехмерная модель распространения чирпированных световых импульсов в углеродных нанотрубках. В качестве исходных импульсов были выбраны световые пули, которые обладают минимальным дисперсионным расплыванием [3, 4].

На рис. 1 мы отлично видим, что при увеличении времени импульс раздваивается и идет на уширение, но при этом он устойчив и стабилен.

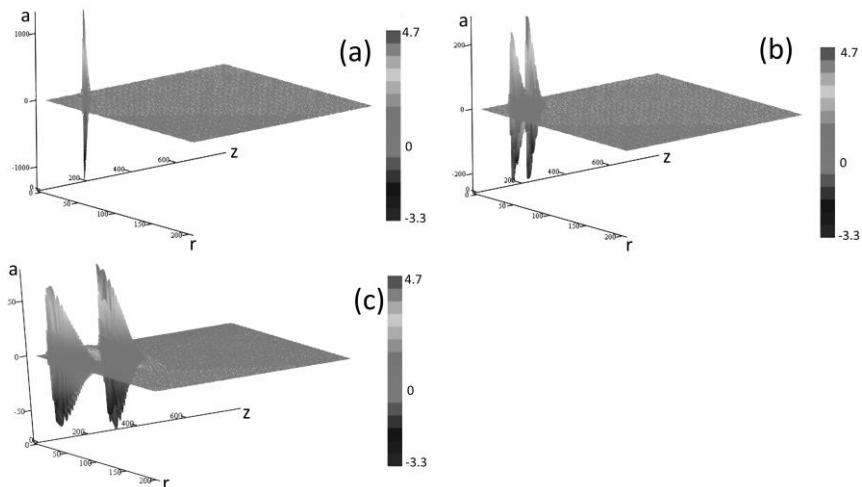


Рис. 1. Изменение формы импульса чирпированных световых пуль в углеродных нанотрубках со скоростью $u = 0.93$ нм: $t = 2$ с (a); $t = 500$ с (b); $t = 1500$ с (c)

Проведенные расчеты показывают, что возможно устойчивое распространение трехмерных чирпированных световых пуль в среде углеродных нанотрубок. Отметим, что ранее такого эффекта не наблюдали.

Список литературы

1. Leblond H., Mihalache D. // Phys. Rev. A. 2012. V. 86. P. 043832.
2. Skorobogatiy M., Yang J. Fundamentals of Photonic Crystal Guiding. Cambridge University Press, 2009.
3. Harris P.J.F. Carbon nanotubes and related structures. Cambridge University Press, 2009.
4. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. М.: Техносфера, 2003.

Д.М. ИВАНОВ, Д.Д. РУЖИЦКАЯ,
С.Б. РЫЖИКОВ, Ю.В. РЫЖИКОВА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ДЕНДРИТНОГО ТИПА

Рассмотрены особенности построения фрактальных распределений дендритных структур с использованием свойств стохастических фракталов. Приведены модифицированные алгоритмы расчета фрактальных характеристик применительно к системам дендритного типа. Выявлены зоны неустойчивости на начальных этапах формирования дендритных структур.

D.M. IVANOV, D.D. RUZHITSKAYA,
S.B. RYZHIKOV, Yu.V. RYZHIKOVA

Lomonosov Moscow State University

STABILITY ANALYSIS OF DENDRITIC TYPE SYSTEM CHARACTERISTICS

The features of the construction of fractal distributions of dendritic structures using the properties of stochastic fractals are considered. The modified algorithms for calculating fractal characteristics as applied to dendritic type systems are given. The zones of instability at the initial stages of the formation of dendritic structures are identified.

Изучение природоподобных систем является перспективным направлением современной науки и техники [1-3]. Первичный этап их формирования часто связан с возникновением в результате самоорганизации структур дендритной геометрии различной сложности. Этот факт широко используется в анализе начальных стадий некоторых форм биологического морфогенеза [4]. Особую актуальность имеют диагностические приложения, связанные с разработкой новых элементов и устройств сложной конфигурации [5].

Целью настоящей работы является расширение общих представлений о возможностях идентификации дендритных систем, сформированных в процессе самоорганизации наночастиц при использовании 2D стохастических моделей и фрактальной параметризации.

Исследования фрактальных характеристик дендритных структур, получаемых в процессе самоорганизации наночастиц, основаны на

развитии простого способа построения 2D фрактального кластера с центральной симметрией [5, 6]. Результаты построения структур кластеров дендритной формы согласуются с известными моделями «ограниченная диффузией агрегация» и «баллистическая агрегация – кластер» [1, 7].

В данной работе разработанные ранее расчетные алгоритмы построения дендритных структур [6] были модифицированы для увеличения числа образующих частиц и количества затравочных центров. Фрактальные характеристики дендритных структур и их картины дифракции рассчитываются на основе представлений о массовой (кластерной) фрактальной размерности [7]. В результате анализа дендритных структур выявлены зоны неустойчивости на начальных этапах их формирования. Это позволяет разработать новый подход к анализу скейлинговых параметров дендритных систем.

Проведенный анализ оптических и скейлинговых свойств решетчатых систем дендритного типа устанавливает количественную связь между морфологическими особенностями рассмотренных объектов и фрактальностью их оптических характеристик. Полученные результаты исследования фрактальных свойств в характеристиках дендритов указывают на дополнительные диагностические возможности фрактальных методов для широкого класса стохастических структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00723 а.

Список литературы

1. Nicolás-Carlock J.R., Carrillo-Estrada J.L., Dossetti V. Fractality à la carte: a general particle aggregation model // Scientific reports. 2016. V. 6. P. 19505.
2. Логачев П.А., Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Самоорганизация фрактальных кластеров дендритных образований // Сборник научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2017. С. 144-145.
3. Рыжикова Ю.В., Рыжиков С.Б. Фрактальные свойства самоорганизующихся дендритных структур // Ученые записки физического ф-та Моск. Ун-та. 2018. № 5. С. 1850401.
4. Исаева В.В. Моделирование и анализ морфогенеза Metazoa на основе концепций топологии и фрактальной геометрии. // Вестник ДВО РАН. 2015. № 1. С. 5-13.
5. Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Оптические свойства фрактальных нанодендритов в процессах их самоорганизации. // Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика, астрономия. 2018. № 3. С. 69-73.
6. Ружицкая Д.Д., Рыжикова Ю.В., Рыжиков С.Б. Алгоритмы анализа характеристик дендритных структур. // Известия РАН. Серия физическая. 2018. № 11. С. 1512-1515.
7. Самсонов В.М., Кузнецова Ю.В., Дьякова Е.В. О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 2. С. 71-77.

А.И. АНТОНОВ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ФУРЬЕ-РАЗЛОЖЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ТОНКИХ СЛОЕВ ПИЛООБРАЗНЫХ
МИКРОСТРУКТУР В РАМКАХ RCWA-МЕТОДА**

Выведены выражения для коэффициентов фурье-разложения в ряд диэлектрической проницаемости тонких слоев одномерных двухрельефных дифракционных микроструктур пилообразной формы в рамках RCWA-метода. Представлены сравнительные графики результатов расчета дифракционных эффективностей рельефно-фазовых микроструктур в рамках скалярной теории дифракции и RCWA-методом.

A.I. ANTONOV

Penza State University of Architecture and Construction

**DEFINITION OF THE FOURIER COEFFICIENTS
DECOMPOSITION OF THE DIELECTRIC PERMEABILITY
OF THIN LAYERS OF SAWTOOTH MICROSTRUCTURES
WITHIN THE FRAMEWORK OF THE RCWA**

Expressions for the Fourier coefficients of the expansion in a series of dielectric permittivity of thin layers of one-dimensional two-relief diffraction microstructures of sawtooth-form in the RCWA are derived. Comparative graphs of the results of the calculation of the diffraction efficiencies of relief-phase microstructures in the framework of the scalar theory of diffraction and the RCWA method are presented.

В рамках строгого метода связанных волн (RCWA) рельефно-фазовая периодическая дифракционная микроструктура разделяется на тонкие периодические слои однородные в направлении высоты рельефа. Диэлектрическая проницаемость каждого такого слоя $\epsilon_n(x)$ представляется в виде ряда Фурье и для дальнейших расчетов подставляется в уравнения Максвелла [1]. Для структуры с периодом Λ :

$$\epsilon_n(x) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \tilde{\epsilon}_{h,n} e^{jhKx}, \quad \tilde{\epsilon}_{h,n} = \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} f_{\epsilon,n}(x) e^{-jhKx} dx, \quad (1)$$

где n – номер тонкого слоя, отсчитываемый от области вхождения излучения. Функция $f_{\epsilon,n}(x)$ есть распределение значений диэлектрической проницаемости в различных точках периода микроструктуры.

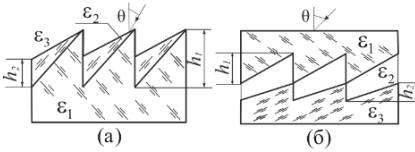


Рис. 1. Конфигурации двухрельфных пилообразных микроструктур: с внутренним и наружным рельефами (а), с двумя внутренними рельефами (б)

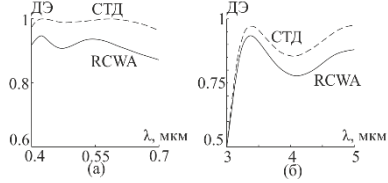


Рис. 2. Спектральные зависимости дифракционной эффективности структур с рис. 1

На рис. 1 представлены две конфигурации двухрельфных пилообразных микроструктур: с внутренним и наружным рельефами (а), с двумя внутренними рельефами (б). Согласно (1), коэффициенты Фурье для микроструктур $\tilde{\epsilon}_{a,h,n}$ (а) и $\tilde{\epsilon}_{\delta,h,n}$ (б) с параметрами высот h_1 и h_2 , как показано на рис. 2, будут определяться через варьирование границ областей с каждым значением диэлектрических проницаемостей от одного тонкого периодического слоя к другому. Пусть структура (а) разбивается на N слоев, а верхний и нижний рельефы (б) – на N_1 и N_2 , соответственно. Введем обозначения $N' = [N((h_1 - h_2)/h_1)]$, $\tilde{f}_{12} = n/N_1$, $\tilde{f}_{23} = (n - N_1)/N_2$, $\tilde{f}_2 = n(1/N' - 1/N)$, $\tilde{f}_3 = n/N$. Тогда, для $h \neq 0$:

$$\tilde{\epsilon}_{a,h,n} = j((\epsilon_2 - \epsilon_1)(e^{j2\pi h(\tilde{f}_3 - 1)} - e^{j2\pi h(\tilde{f}_2 + \tilde{f}_3 - 1)}) - (\epsilon_3 - \epsilon_1)(e^{j2\pi h(\tilde{f}_3 - 1)} - e^{-j2\pi h})) / (2\pi h)$$

при $n = 1, \dots, N'$, $\tilde{\epsilon}_{a,h,n} = j(\epsilon_2 - \epsilon_3)(e^{j2\pi h(\tilde{f}_2 - 1)} - e^{-j2\pi h}) / (2\pi h)$ при $n = N' + 1, \dots, N$;

$$\tilde{\epsilon}_{\delta,h,n} = j(\epsilon_1 - \epsilon_2)(e^{j2\pi h(\tilde{f}_{12} - 1)} - e^{-j2\pi h}) / (2\pi h)$$
 при $n = 1, \dots, N_1$,
$$\tilde{\epsilon}_{\delta,h,n} = j(\epsilon_2 - \epsilon_3)(e^{j2\pi h(\tilde{f}_{23} - 1)} - e^{-j2\pi h}) / (2\pi h)$$
 при $n = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$.

Для $h = 0$ коэффициент Фурье получается через подстановку $\tilde{\epsilon}_{h,n}$ в $\epsilon_n(x)$: $\tilde{\epsilon}_{a,h,n} = \epsilon_2 \tilde{f}_2 + \epsilon_3 \tilde{f}_3 + \epsilon_1(1 - (\tilde{f}_2 + \tilde{f}_3))$ при $n = 1, \dots, N'$, $\tilde{\epsilon}_{a,h,n} = \epsilon_3 \tilde{f}_3 + \epsilon_2(1 - \tilde{f}_3)$ при $n = N' + 1, \dots, N$; $\tilde{\epsilon}_{\delta,h,n} = \epsilon_2 \tilde{f}_{12} + \epsilon_1(1 - \tilde{f}_{12})$ при $n = 1, \dots, N_1$, $\tilde{\epsilon}_{\delta,h,n} = \epsilon_3 \tilde{f}_{23} + \epsilon_2(1 - \tilde{f}_{23})$ при $n = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2$. При численной реализации алгоритма RCWA переход от между $h \neq 0$ и $h = 0$, и различных множеств для n можно осуществить через кусочную функцию или условный оператор. На рис. 2 представлены полученные в рамках скалярной теории дифракции (СТД) и RCWA-методом спектральные зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) структур (а) и (б) для угла падения излучения 10° . У структуры (а) $h_1 = 15.1$ мкм, $h_2 = 11.7$ мкм, $\Lambda = 20h_1$, у структуры (б) $h_1 = 31.06$ мкм, $h_2 = 53.47$ мкм, $\Lambda = 20(h_1 + h_2)$. Чем выше число мод и тонких периодических слоев принято в конкретном расчете, тем выше точность результатов RCWA-метода.

Список литературы

1. Moharam M.G., Gaylord T.K. // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. № 10. P. 1385.

В.И. ШОСТКА, Н.В. ШОСТКА

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ

В работе рассмотрен достаточно простой метод лазерной интерферометрии, предложенный авторами, особенность которого заключается в использовании амплитудно-фазовой модуляции расширенного лазерного пучка при прохождении через слой капли воды, позволяющий рассматривать процессы формирования и изменения ее структуры в приповерхностном слое. Одной из сложных задач является идентификация структуры воды и доказательство существования стабильных структурных ее элементов, что сделано авторами впервые.

V.I. SHOSTKA, N.V. SHOSTKA

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

IDENTIFICATION OF FRACTAL CLUSTER STRUCTURES IN THE SURFACE LAYER OF WATER

The paper considers a fairly simple method of laser interferometry proposed by the authors, the peculiarity of which is the use of amplitude-phase modulation of an extended laser beam when passing through a layer of water droplets, which allows us to consider the processes of formation and change of the inhomogeneous structure in its near-surface layer. One of the difficult tasks is the experimental decoding of water structure and the proof of its stable structural elements' existence, which is done by the authors for the first time.

Благодаря межмолекулярным водородным связям вода по своим свойствам отличается от других гидридов, имеет ассоциативную структуру, в которой формируется огромное количество метастабильных состояний. Особенности строения воды объясняются наличием порядка в ее различных состояниях, являющегося следствием кооперативного эффекта изменяющейся неоднородной сетки водородных связей. Отдельные молекулы, соединенные водородными связями, объединяются в кластеры, клатраты и ассоциаты [1]. Время существования устойчивых кластеров в объемной фазе воды не превышает 0,01 наносекунды [1, 2]. Попадая в приповерхностный слой, короткоживущие кластеры стабилизируются, и время их жизни существенно возрастает.

Целью работы является применение оптических методов для исследования структуры воды, как неупорядоченной жидкости, которая,

несмотря на то, что водородные связи в ней являются короткоживущими, способна к самоорганизации вследствие образования новых водородных связей и кооперативных эффектов.

Рассмотрен достаточно просто реализуемый метод лазерной интерферометрии, особенность которого заключалась в применении амплитудно-фазовой модуляции расширенного лазерного пучка при прохождении через слой капли воды, позволяющий рассматривать процессы формирования и изменения фрактально-кластерной структуры в приповерхностном слое воды [2, 3]. В результате проведенных исследований зафиксированы структуры кластеров в приповерхностном слое воды, некоторые из которых приведены на рис. 1.

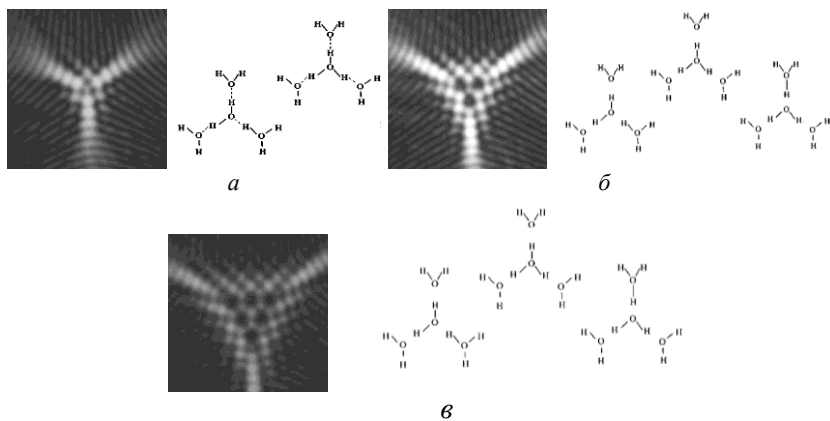


Рис. 1. Структура и крокетный механизм формирования кластеров (ассоциатов) воды: $H_{11}O_5$ (а), $H_{21}O_{10}$ (б), $H_{29}O_{14}$ (в)

Список литературы

1. Ролдугин В.И. // Успехи химии. 2003. Т. 72. (10). С. 931-959.
2. Lapayeva S.N., Vershitskiy V.I., Shostka V.I. // Proceeding of SPIE. 2004. V. 5582. P. 187-195.
3. Шостка В.И., Шостка Н.В., Доненко И.Л. // Сб: Взгляд молодых на проблемы региональной экономики - 2017. Материалы Всероссийского открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. 2017. С. 41-44.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, С.С. АНУФРИК, А.М. ЛЯЛИКОВ
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

**ПРИМЕНЕНИЕ МУАРОВОГО ЭФФЕКТА
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МАКРОДЕФЕКТОВ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Предложен простой с точки зрения технической реализации муаровый способ визуализации макродефектов пропускающей динамической периодической структуры. Приведены результаты эксперимента с визуализацией динамики макродефектов исследуемой периодической структуры.

N.T. AVLASEVICH, S.S. ANUFRIK, A.M. LYALIKOV
Y. Kupala Grodno State University, Belarus

**APPLICATION OF THE MUAR EFFECT
FOR VISUALIZATION OF MACRODEFECTS
OF DYNAMIC PERIODIC STRUCTURES**

A simple from the point of view of technical implementation of the moire method of visualization of macrodefects of a transmissive dynamic periodic structure is proposed. The results of the experiment with the visualization of the dynamics of macrodefects of the studied periodic structure are presented.

Одной из актуальных задач по контролю качества структурированных объектов является выявление и оценка величины макродефектов периодической структуры. Примером решения таких задач является контроль качества дифракционных оптических элементов [1, 2].

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден, сравнительно простой с точки зрения технической реализации, муаровый способ визуализации макродефектов пропускающей динамической периодической структуры [3]. Способ основан на регистрации в различные моменты времени серии снимков динамической периодической структуры и последующем формировании муаровой картины, наблюдаемой на фоне матового экрана, при совмещении выбранной пары снимков.

В качестве исследуемого объекта была выбрана периодическая металлическая маска, поверхность которой подвергалась механической деформации. Серия снимков данного объекта регистрировалась пленочным зеркальным фотоаппаратом Зенит TTL на фотопленку Микрат

300. При этом плоскость снимка оптически сопрягалась с плоскостью исследуемой периодической структуры. Применение высоко-разрешающей фотографической эмульсии и химической обработки в контрастном проявителе позволило получать высококачественные снимки исследуемой периодической структуры.

Муаровые картины, отображающие динамику развития деформации поверхности исследуемой металлической маски при использовании пары снимков в различные моменты времени, регистрировались цифровой камерой CCD при фокусировке на плоскость совмещенных снимков, установленных на фоне диффузного рассеивателя.

На рис. 1 приведены фотографии муаровых картин, полученных при использовании пар снимков, зарегистрированных в различные моменты времени ($t_1 = 1$ с, $t_2 = 3$ с, $t_3 = 5$ с, $t_4 = 8$ с и $t_5 = 12$ с после начала деформации поверхности исследуемой металлической маски).

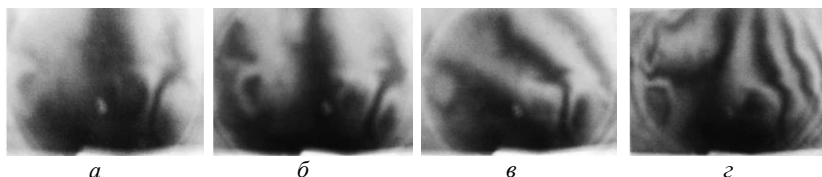


Рис. 1. Фотографии муаровых картин пар снимков, зарегистрированных в различные моменты времени: t_1 и t_3 (а), t_3 и t_5 (б), t_2 и t_4 (в), t_1 и t_5 (г)

Для получения количественных характеристик муаровые картины могут быть обработаны по известным алгоритмам цифровой обработки интерферограмм [3]. Следует отметить перспективность применения данного способа визуализации макродефектов для исследования качества лазерных нано- и микроструктурированных активных сред [4].

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Буть А.И., Ляликов А.М. // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. М.: МИФИ. 2017. С. 622-623.
2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Проблемы физики, математики и техники. 2017. № 3. С.7-13.
3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. 2018. Т. 8. № 3. С. 55-62.
4. Malacara D., Servin M., Malacara Z. Interferogram Analysis for Optical Testing // Taylor & Francis Group. 2005.

А.П. БОЙЧЕНКО, Д.В. ШАЙТАНОВ
Кубанский государственный университет, Краснодар

**ЭЛЕКТРОПОЛЕВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
НА РЕНТГЕНОВСКИХ ФОТОМАТЕРИАЛАХ
С ИСТЕКШИМ СРОКОМ ГОДНОСТИ**

На примере рентгеновских фотопленок «Retina» и «Agfa» с истекшим сроком годности показана возможность их использования в электрополевой фотографии, что достигается вариацией концентрации восстановителя серебра (проявителя). Оптимальным для этого является его раствор в диапазоне 12-25%.

A.P. BOYCHENKO, D.V. SHAYTANOV
Kuban State University, Krasnodar

**ELECTRICAL FIELD VISUALIZATION ON X-RAY
PHOTOMATERIALS WITH EXPIRATION DATE**

Using the example of X-ray «Retina» and «Agfa» films with expired shelf life, the possibility of using them in electric field photography is shown, which is achieved by varying the concentration of silver reducing agent (developer). The optimal solution for this is in the range of 12-25%.

Как известно, любой галогенсеребряный (AgHal) фотоматериал со временем «стареет», что, прежде всего, проявляется в падении его светочувствительности и образовании оптической вуали значительных величин при химико-фотографической обработке. Такой фотоматериал уже не используют по назначению и обычно перерабатывают или утилизируют. Настоящая работа посвящена использованию AgHal-фотоматериала с истекшим сроком годности в электрополевой фотографии (ЭПФ) на примере рентгеновских пленок «Retina» и «Agfa». Для первой фотопленки этот срок составил 16 лет, а для второй – 4 года.

Обе фотопленки экспонировались в десятикратной повторности на ранее описанной установке [1] односекундным импульсом напряжения 1 kV разной полярности и затем обрабатывались в контрастном, фенидон-гидрохиноновом проявителе следующих концентраций – C , %: 100 (исходный раствор); 50; 25; 12,5; 6,25. Полученные на них электрополевые изображения (ЭПИ) полусферического электрода денситометрировались по модифицированной нами методике [2].

Результат оценки оптической плотности ЭПИ – D и ее зависимости от C приведен ниже на диаграммах (рис. 1).

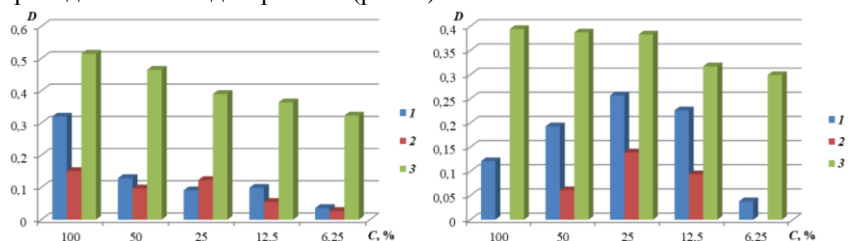


Рис. 1. Зависимость $D(C)$ для AgHal-фотопленок «Retina» (слева) и «Agfa» (справа) при полярности напряжения: положительной (1); отрицательной (2); оптическая вуаль (3)

По ним виден монотонный спад D оптической вуали с уменьшением C для обеих фотопленок. Однако, D ЭПИ на фотопленках носит совершенно иную зависимость, характерную для соответствующей полярности напряжения. Так, у «Retina» эта зависимость имеет волнообразно-затухающий характер с небольшим максимумом для «отрицательных» изображений при $C = 25\%$, а для «положительных» – при $12,5\%$. На «Agfa», D разнополярных ЭПИ выражена параболической зависимостью с максимумом при C той же величины, а при ее концентрациях в 100% и $6,25\%$ «отрицательные» ЭПИ вообще отсутствуют. Очевидно это связано с пластинчатой формой фотоэмульсионных микрокристаллов AgHal данной фотопленки [1], а также особенностями образования в них Ag-центров скрытого ЭПИ, взаимодействия с компонентами проявителя и меньшим сроком годности по сравнению «Retina».

Обобщая результаты проведенной работы можно сделать следующие предварительные выводы: 1) AgHal-фотоматериалы для рентгенографии с истекшим сроком годности до 16 лет могут быть использованы в ЭПФ; 2) такие из них, как «Retina» и «Agfa», требуют для обеспечения малого уровня вуали и достижения наибольшей D ЭПИ низкие C проявителя, что реализуется при ориентировочном значении его диапазона $12-25\%$.

Список литературы

1. 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.
2. Кравцов А.Е., Резников М.А., Пипа В.И., Фок М.В. О природе электрочувствительности фотографических эмульсионных слоев // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1977. Т. 22. № 3. С. 186-195.

И.Л. ДОНЕНКО

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

МОДИФИКАЦИЯ ПРИБОРА НОЧНОГО ВИДЕНИЯ МЕТОДАМИ ФРАКТАЛЬНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Приведены результаты эксперимента проведенного на основе математических расчетов для улучшения прибора ночного видения при использовании фрактальных дифракционных решеток. Разработана оптоэлектронная система для автоматизирования настройки фокусного расстояния при использовании фрактальных дифракционных решеток.

I.L. DONENKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

MODIFICATION OF THE NIGHT VISION APPARATUS BY METHODS OF FRACTAL OPTOELECTRONICS

The results of an experiment based on mathematical calculations for improving the night vision device using fractal diffraction gratings are presented. An optoelectronic system has been developed to automate the adjustment of the focal length using fractal diffraction gratings.

В настоящее время дифракционные оптические элементы используются для выполнения разнообразных оптических преобразований, при этом суггестируя только с фазой проходящей электромагнитной волны. В современном мире использование ПНВ стало повсеместным. Но, качество получаемого изображения на электронно-оптическом преобразователе и ПЗС-матрице желают лучшего, во время работы прибора ночного видения на экране возникают различные оптические аберрации и помехи при генерации рельефа. Метод модификации современных ПНВ кардинально отличается от предложенных ранее. Особенностью данного способа является использование современного математического аппарата и применение теории фракталов и хаоса – данных разделов науки в целях улучшениях оптоэлектронных приборов.

Целью работы является улучшение характеристик многих современных приборов ночного видения, в частности получаемых изображений. Для проведения эксперимента была изготовлена зонная пластинка с нанесенным на нее ковром Серпинского с шагом в длину

Талбота (Z_t), данная фрактальная структура были выбрана исходя из прошлых удачных экспериментов по дифракции Френеля произведенная с ними.

На рис. 1 представлен результат работы прибора ночного видения без использования фрактальной дифракционной картины, а на рис. 2 с использованием ковра Серпинского. Мы использовали прибор ночного видения с двухкратным увеличением и объективом 33 мм.

Применение фрактальной дифракционной решетки позволяет увеличить качество получаемого изображения. При использовании фрактальной дифракционной решетки значительно уменьшились aberrации и количество шумов. На основе данного эксперимента было разработано автоматическую доводку фокуса на основе микрокомпьютеров Arduino. Причиной уменьшения шумов и aberrаций на получаемом изображении, является использование фрактальной дифракционной решетки, при падении на решетку световых волн происходит процесс перераспределения волнового фронта в пространстве, что снижает многие отрицательные факторы работы прибора ночного видения.

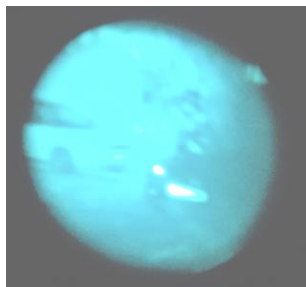


Рис. 1. Фото без использования фрактальной зонной пластинки

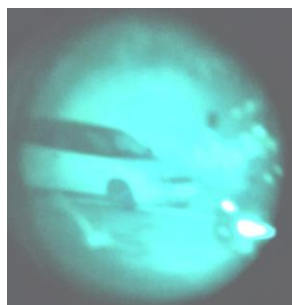


Рис. 2. Фото с использованием фрактальной зонной пластинки с нанесенным туда ковром Серпинского

Список литературы

1. Technical means of information protection: A manual for students of specialties "Organization and technology of information protection" and "Comprehensive protection of information objects". Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2010.
2. Virtual simulation and research of optical fractal mappings. Tambov: Tambov State Technical University, 2017.

Е.П. АВЕРОЧКИН, С.Б. РЫЖИКОВ, Ю.В. РЫЖИКОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АППРОКСИМАНТОВ ФРАКТАЛОПОДОБНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР С МЕТАМАТЕРИАЛАМИ

Исследованы спектральные характеристики фракталоподобных аппроксимантов многослойных систем с вставками из метаматериалов. Особое внимание уделено оценкам степени влияния дисперсионных эффектов на изменение формы спектров отражения или пропускания рассмотренных систем.

E.P. AVEROCHKIN, S.B. RYZHIKOV, Yu.V. RYZHIKOVA
Lomonosov Moscow State University

OPTICAL PROPERTIES OF APPROXIMANTS OF FRACTAL-LIKE MULTILAYER STRUCTURES WITH METAMATERIALS

The spectral characteristics of fractal-like approximants of multilayer systems with inserts of metamaterials are investigated. Special attention is paid to the influence of dispersion effects on the change in the shape of the reflection or transmission spectra of the systems considered.

Исследование многослойных структур с метаматериалами является перспективным направлением современных наукоёмких технологий, что обусловлено их уникальными свойствами, связанными с наличием запрещенных зон, устойчивых к изменению наклона падающих световых волн. Это позволяет улучшить спектральные характеристики волноведущих систем и некоторых элементов технических устройств.

Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию спектральных характеристик аперидических фракталоподобных структур [1-4], оптические свойства их аппроксимантов не изучены в полной мере. Так, совершенствование и разработка новых методов оптической диагностики связано с решением ряда важных вопросов. В частности, мало исследован вопрос о нахождении условий формирования и трансформации фрактальных свойств оптических характеристик аппроксимантов разной геометрии, как полностью диэлектрических структур, так и содержащих метаслои. Так же не достаточно изучен

вопрос о степени влияния метаматериалов на оптические характеристики аппроксимантов.

В данной работе указанные выше вопросы рассмотрены на основе численного моделирования применительно к фракталоподобным многослойным структурам и их аппроксимантам. Особое внимание уделено анализу влияния дисперсионных эффектов на изменение формы паттерных образований [2], фиксируемых в спектрах отражения фракталоподобных многослойных систем с метаматериалами. При численном моделировании фракталоподобных многослойных систем и их аппроксимантов использовались свойства квазипериодических числовых последовательностей [5]. Оптические свойства метаматериалов задаются прямым указанием дисперсионных соотношений для диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости [4, 6].

Определение степени влияния дисперсионных эффектов на изменение формы паттернов, фиксируемых в спектрах отражения фракталоподобных многослойных систем, проводилось на основе корреляционного анализа. В ходе исследований использовались разработанные ранее требования к числу слоев аппроксимантов полностью диэлектрических фракталоподобных систем [7]. Они позволяют получить максимальное соответствие по форме спектров отражения аппроксимантов и многослойных систем, имеющих с ними сходное геометрическое построение. В результате работы получены оценки степени влияния дисперсионных эффектов на изменение формы спектров отражения или пропускания рассмотренных систем, что позволяет установить единые критерии для их идентификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00723 а.

Список литературы

1. Negro L.D. Optics of Aperiodic Structures – Fundamentals and Device Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
2. Ryzhikova Yu.V., Korolenko P.V., Ryzhikov S.B. // Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring. Saint-Petersburg, 2017. P. 2742-2745.
3. Давыдова М.Г., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика, астрон. 2016. № 4. С. 56-61.
4. Davydova M.G., Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu.V. // Physics of Wave Phenomena. 2016. № 1. V. 24. P. 17-21.
5. Мучник А.А., Притыкин Ю.Л., Семенов А.Л. // УМН. 2009. Т. 64. № 5. С. 21-96.
6. Aghajamali A., Javanmardi B., Barati M., Wu C.-J. // Optik. 2014. V. 125. P.839-843.
7. Короленко П.В., Логачев П.А., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 3. С. 66-71.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск

НОВЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЖК

Разработан новый фотосшиваемый полимер, поверхность слоев которого после натирания тканью и последующего УФ-облучения приобретает способность ориентировать жидкокристаллические материалы. В отличие от известных бензальдегидных ориентантов, новый полимер эффективно сшивается УФ-излучением с $\lambda = 365$ нм и не уступает им в ориентирующей способности.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH
Belarusian State University, Minsk

NOVEL POLYMER MATERIAL FOR PHOTO-STIMULATED ORIENTATION OF LC

A new photo-crosslinking material has been developed, the surface of the layers of which, after rubbing with a cloth and subsequent UV irradiation, acquires the ability to align LC materials. In contrast to the known benzaldehyde alignment materials, the new polymer is effectively crosslinked by UV radiation with $\lambda = 365$ nm and equals to them in the alignment ability.

Разработанные нами ранее бензальдегидсодержащие полимеры (БП) обладают рядом практически значимых свойств, в частности, способностью ориентировать жидкие кристаллы (ЖК) в результате воздействия на полимерные слои механического натирания и последующего УФ-облучения (фотостимулированная ориентация) [1]. Эти материалы позволяют формировать ориентирующие свойства на локальных участках под действием света, а также при плавном изменении освещенности для материалов определенного типа (градиентных) удается добиваться плавного изменения угла преднаклона ЖК [2]. Кроме того, используемые в качестве ориентирующего материала фоточувствительные полимеры обладают после облучения таким практически важным свойством, как высокая устойчивость к внешним (температурным, жидкостным, механическим и т.д.) воздействиям, благодаря их фотопревращению в полимерную сетку (фотосшивание). Однако, разработанные БП обладают спектральным диапазоном чувствительности в области $\lambda < 350$ нм (рис. 1а). Это обстоятельство не

позволяет использовать в технологиях их применений мощные светодиодные и лазерные источники оптического излучения.

Для устранения этого недостатка нами разработан новый фотосшиваемый полимер со спектром поглощения, существенно смещенным в область больших длин волн (рис. 1а). Этот полимер также способен после механического натирания и последующего облучения (например, линией $\lambda = 365$ нм ртутной лампы или излучением светодиода той же длины волны) образовывать прочно сшитые полимерные слои, ориентирующие ЖК-материалы.

Эффективность ориентации ЖК на разработанном полимере подтверждается данными рис. 1б, демонстрирующими одинаковый максимальный уровень двулучепреломления dn ЖК-мономера (RMM491, Мерск) при его ориентации с помощью БП (кривая 1) и нового полимера (кривая 2).

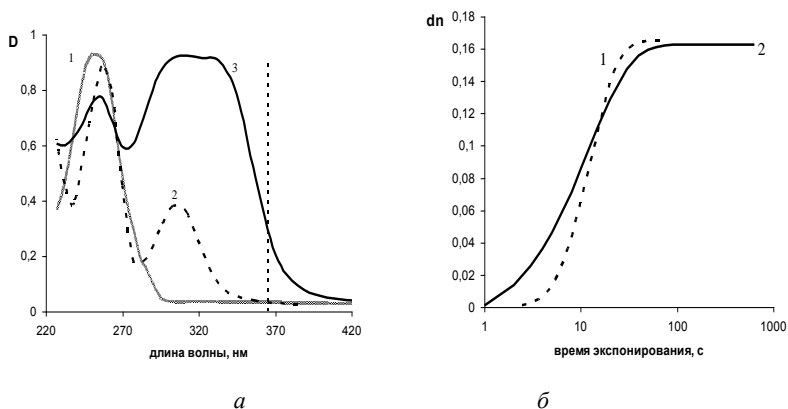


Рис. 1. Спектры поглощения БП (1, 2) и нового полимера (3) (а); зависимости двулучепреломления слоев ЖК-мономера от времени облучения ориентантов светом ртутной лампы: БП (1) $\lambda < 350$ нм, нового полимера (2) $\lambda = 365$ нм (б)

Список литературы

1. Mahilny U.V. et. al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 121-125.
2. Bezruchenko V.S., et. al. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2016. V. 626. № 1. P. 222-228.

О.Б. КУДИНОВ, А.В. БЕЛАШОВ^{1,2}, Н.В. ПЕТРОВ¹, А.П. ХУРЧАК

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯТОР СВЕТА НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСПЛЕЯ ELT240320ATP И МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO

Представлено экспериментальное исследование динамической пространственной фазовой модуляции, осуществляемой жидкокристаллическим (ЖК) дисплеем ELT240320ATP под управлением микроконтроллера Arduino. Экспериментально измерен фазовый набег, вносимый жидкокристаллическим дисплеем с загруженным бинарным изображением.

O.B. KUDINOV, A.V. BELASHOV^{1,2}, N.V. PETROV¹,

A.P. KHURCHAK

Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Sebastopol

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

SPATIAL LIGHT MODULATOR BASED ON LIQUID CRYSTAL DISPLAY ELT240320ATP AND ARDUINO

Presents the result of experiments on the study of dynamic spatial phase modulation performed by an LCD ELT240320ATP based on Arduino. The phase shift introduced by a liquid crystal display with a loaded binary image was experimentally measured.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) находят широкое применение в системах оптической обработки информации и синтезе цифровых голограмм. Однако, эти приборы достаточно дороги, что существенно ограничивает их применение.

Цель настоящей работы заключалась в практической реализации и экспериментальном исследовании ПВМС из доступных электронных компонентов, как было предложено в [1] и определении принципиальной пригодности сконструированного устройства для практической реализации метода безлинзовой вычислительной микроскопии сверхвысокого разрешения SR-SPAR [2].

Для использования дисплея ELT240320ATP в качестве ПВМС, с поверхности ЖК матрицы были удалены плёнки, отвечающие за

равномерную подсветку и поляризатор. Светодиоды подсветки были отключены, а для удобства эксплуатации устройства микроконтроллер Arduino и ЖК матрица были смонтированы в корпус, изготовленный посредством 3D-печати.

Измерение пространственного распределения фазового запаздывания, формируемого изготовленным ПВМС, проводилось методом цифровой голографической интерферометрии. Для регистрации цифровых голограмм использовалась экспериментальная оптическая установка на базе интерферометра Маха-Цендера, с вращающейся плоскопараллельной пластиной. В качестве источника когерентного излучения был использован твердотельный лазер с диодной накачкой, излучающий на длине волны 532 нм. Запись и восстановление цифровых голограмм осуществлялись согласно методу фазовых шагов. Таким образом, были получены пространственные распределения фазового запаздывания в отсутствие и с исследуемым объектом. Их разность является исследуемой характеристикой ПВМС. В ходе измерений на ЖК дисплей подавалось бинарное изображение. Пример фрагмента такого изображения и измеренное фазовое запаздывание, показаны на рис. 1а, б. Из графика поперечного сечения фазового запаздывания в области обозначенной синей линией (см. рис. 1 в) видно, что при данных условиях эксперимента характерный фазовый набег составляет порядка 3,8-4 радиан, а ширина резкого перепада фазы не превышает 7,5 мкм.

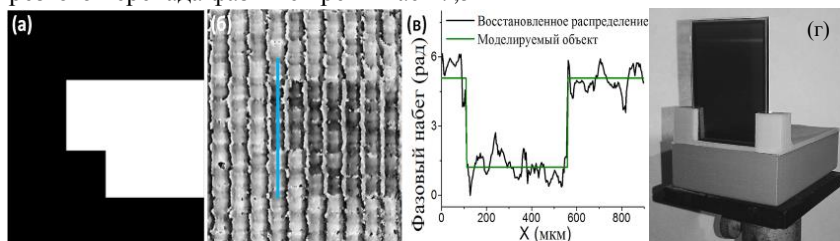


Рис. 1. Фрагмент бинарного изображения объекта выводимого на ЖК дисплей (а), измеренное распределение фазового запаздывания (б), и график соответствующего поперечного сечения, отмеченного синей линией (в) для изготовленного ПВМС (с)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-42-920003).

Список литературы

1. <https://beniroquai.wordpress.com/2016/08/02/arduino-il9341-lcd-matlabpythonserial-interaction/>.
2. Katkovnik V., Shevkunov I.A., Petrov N.V., Egiazarian K. // Optica. 2017. V. 4. № 7. P. 786.

В.А. ЕЖОВ, И.Н. КОМПАНЕЦ¹

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

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

ДИСТАНЦИОННЫЙ БИНОКУЛЯРНЫЙ СЖК ФИЛЬТР ДЛЯ БЕЗОЧКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ МИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Предложена концепция быстродействующего дистанционного бинокулярного фильтра (ДБФ) с сегнетоэлектрическим жидкокристаллическим (СЖК) рабочим слоем для безочкового наблюдения стереоизображений миллисекундной длительности с сохранением их высокой яркости за счет точной временной амплитудной селекции световых потоков ракурсных изображений благодаря быстрому (десятки микросекунд) временному оптическому отклику СЖК слоя ДБФ.

V.A. EZHOV, I.N. KOMPANETS¹

Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

DISTANT BINOCULAR FLC FILTER FOR NAKED-EYE OBSERVING THE STEREO SCOPIC IMAGES OF MILLISECOND DURATION

The concept of high-speed distant binocular filter (DBF) with ferroelectric liquid crystal (FLC) work layer for naked-eye observing the stereoscopic images of millisecond duration preserving their high brightness due to precise temporal amplitude selection of light fluxes of the view images with millisecond duration due to fast (tens of microseconds) temporal optical response of FLC layer of the DBF.

Распространенной системой наблюдения стереоизображений является компьютерная система 3D Vision, разработанная компанией nVidia. Система в настольном варианте включает в себя ЖК монитор, работающий с последовательным воспроизведением ракурсных изображений трехмерных (3D) сцен, и активные стереочки nVidia с оптическими затворами на нематическом жидком кристалле (НЖК). Особенностью этой системы [1] является малая (около 3 мс) длительность воспроизведения ракурсных изображений ЖК мониторами при кадровых частотах 100-120 Гц. Стереоизображение, наблюдаемое с помощью НЖК стереочков, характеризуется малой яркостью, поскольку время τ_r

релаксации НЖК затворов (определяющая время их перехода в открытое состояние) составляет около 1,5 мс, сравнимое с длительностью воспроизведения ракурсных изображений на экране (рис. 1).

В настоящей работе предложена концепция ДБФ с СЖК рабочим слоем, позволяющего без стереочков (без любых приспособлений, крепящихся к лицу или голове наблюдателя) наблюдать стереоизображения с сохранением их практически полной яркости независимо от длительности воспроизведения (рис. 2). ДБФ содержит сплошной СЖК слой (например, описанный в [2, 3]) с отдельной электрической адресацией левой W_L и правой W_R областей апертуры ДБФ. Со стороны наблюдателя к СЖК слою примыкает выходной линейный поляризатор p_{out} , скрещенный с линейным поляризатором p_m , расположенным на экране ЖК монитора. Области W_L и W_R апертуры ДБФ открываются попеременно (синхронно с появлением соответственно соответствующих ракурсных изображений на экране) с переходными временами в десятки микросекунд, устраняя потери яркости, неизбежные для НЖК затворов вследствие долгого открытия их апертур. Расчет геометрических параметров ДБФ, исходя из расстояний его апертуры до экрана (Z_m) и до лица наблюдателя (Z_b), приведен в [4].

Проект поддержан Миннауки РФ (RFMEFI60417X0191).

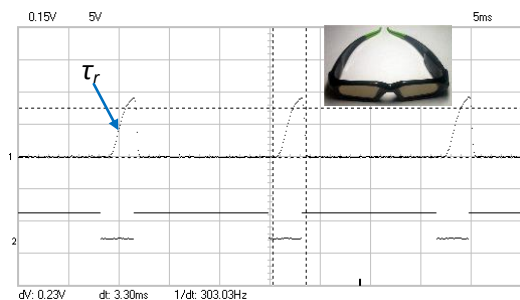


Рис. 1. Отклик НЖК затвора при длительности изображения 3,3 мс

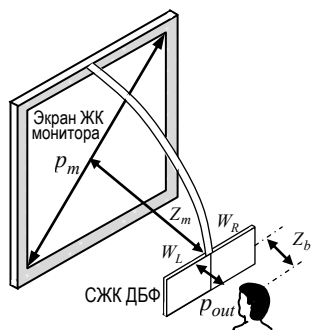


Рис. 2. Стереоскопическая система с ДБФ

Список литературы

1. Slavenburg G. A. // U.S. Patent 7724211. 2010.
2. Kompanets I., Andreev A., Ezhov V., Sobolev A. // U.S. Patent 9532037. 2016.
3. Kompanets I.N., Andreev A.L. // U.S. Patent 9709877. 2017.
4. Ezhov V.A. // J. Display Technol. 2014. V. 10. P. 114.

Л.А. МАКСИМОВА¹, А.А. ДЬЯЧЕНКО^{1,2}, Н.Ю. МЫСИНА¹

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОНКИХ СЛОЕВ ПРИ БОЛЬШОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЕ ПОЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ

Рассматриваются когерентные эффекты при формировании в микроскопе интерференционных изображений тонких слоев при освещающем квазимонохроматическом или частотно широкополосном излучении с широким угловым спектром. Смоделированы мгновенные интерференционные изображения, установлены эффекты влияния ширины углового и частотного спектров освещающего поля на контраст формируемых интерференционных картин.

L.A. MAKSIMOVA¹, A.A. DYACHENKO^{1,2}, N.Yu. MYSINA¹

¹*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

FORMATION OF THE INTERFERENCE MICROSCOPIC IMAGES OF THIN LAYERS AT LARGE NUMERICAL APERTURE OF ILLUMINATING FIELD

The coherent effects at the formation of interference images of thin layers in a microscope with illuminating quasi-monochromatic or frequency broadband radiation with a wide angular spectrum are considered. Instantaneous interference images are simulated and influences of width of angular and frequency spectra of illuminating field on contrast of interference fringes are established.

В микроскопии при определении толщины слоя в доли и единицы микрометра наблюдаются цветные интерференционные изображения слоя при отсутствии внешней опорной волны [1]. Интерференционные поля изображения имеют мгновенный спекл-модулированный характер [2] в силу протяженности источника света и δ -коррелированности волнового поля его излучения. Мгновенная спекл-модулированная интерференционная картина формируется в результате сложения и интерференции множества плоских волн со всевозможными направлениями распространения в пределах угловой апертуры 2θ поля

освещения для каждой составляющей λ его частотного спектра (рис. 1). Параметры мгновенных спеклов определяются числовой апертурой поля освещения $NA_i = n_0 \sin \theta$. Интенсивность результирующего поля определяется суммой интенсивностей интерференционных полей, образующихся для каждой спектральной и угловой составляющих поля освещения [1, 2]. На рис. 2 показано совместное влияние ширины частотного и углового спектров источника на контраст интерференционной картины, формируемой в тонком слое.

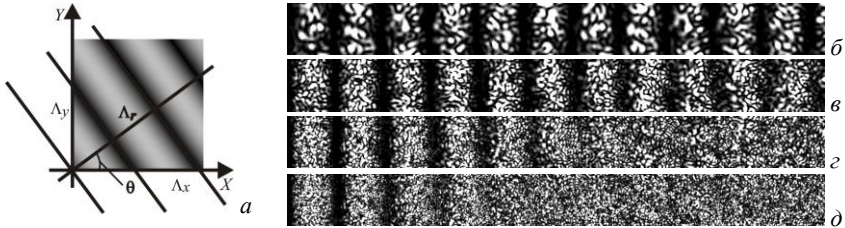


Рис. 1. Распределение поля в падающей плоской компоненте волны (а), мгновенные интерференционные картины, формируемые в тонком линейном клине ($n = 1,5$, $\alpha = 0,02$ рад) в свете протяженного квазимонохроматического источника ($\lambda = 0,55$ мкм, $\Delta\lambda = 0,002$ мкм) при разных NA_i : 0,3 (б); 0,5 (в); 0,7 (г); 0,9 (д)

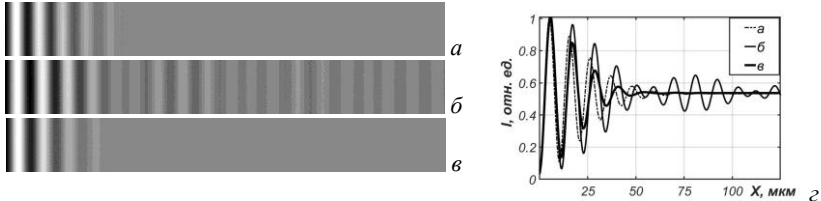


Рис. 2. Влияние ширины частотного и углового спектров поля источника на контраст интерференционной картины в тонком слое: $\Delta\lambda = 0,43 \div 0,83$ мкм, $NA_i = 0$ (а), $\Delta\lambda = 0,629 \div 0,631$, $NA_i = 0,9$ (б), совместное влияние частотного и углового спектров $\Delta\lambda = 0,43 \div 0,83$ мкм, $NA_i = 0,9$ (в), соответствующие кривые распределения интенсивности в интерференционной картине (г)

Эффекты декогерентности, возникающие при формировании картины интерференционных полос в тонком слое с увеличением числовой апертуры NA_i освещающего поля, можно объяснить образованием мгновенных спекл-структур, разрушающих интерференционную картину.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ, проект №16-19-10528.

Список литературы

1. Дьяченко А.А., Рябухо В.П. // Компьютерная оптика. 2017. Т. 47. № 5. С. 670.
2. Лякин Д.В., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П. // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. № 3. С. 348.

А.С. ПЕРЕВОЗНИКОВА^{1,3}, С.Е. ДУБЫНИН^{2,3}, Ю.П. БОРОДИН^{3,4},
А.Н. ПУТИЛИН³, А.В. МОРОЗОВ^{2,3}, С.С. КОПЁНКИН^{3,4}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

³ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОЙ ЗАДЕРЖКИ НА LCoS, РАБОТАЮЩЕГО В НАКЛОННЫХ ПУЧКАХ, В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАХА-ЦЕНДЕРА

В данной работе измеряются характеристики фазового пространственного модулятора света при работе в наклонных пучках. Измерение фазовых характеристик проводится в интерферометре Маха-Цендера.

A.S. PEREVOZNIKOVA^{1,3}, S.E. DUBYNIN^{2,3}, Yu.P. BORODIN^{3,4},
A.N. PUTILIN³, A.V. MOROZOV^{2,3}, S.S. KOPENKIN^{3,4}

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Samsung R&D Institute, Moscow

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow

MEASUREMENTS OF PHASE SHIFT ON LCoS, OPERATING IN TILTED BEAM, BY MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

In this paper we measured parameters of spatial light modulator (SLM) at illumination by tilted collimated beams. Measurements of phase shift were carried out by Mach-Zehnder interferometer.

Для записи голограмм как и для отображения информации давно применяются пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) на базе ЖК. В частности, для вывода компьютерно-синтезированных голограмм используются фазовые ПВМС – LCoS. Данный тип матриц является отражательным и рассчитан на освещение коллимированным пучком по нормали или под малым углом. Зачастую компоновка схемы предполагает подсветку ПВМС наклонным пучком. В данном случае при прохождении излучения через структуру ПВМС (ЖК + ретардер) возникает набег фазы, отличный от заложенного производителем и приведенного на графиках, что существенным образом сказывается на

контрасте (МТФ). Обзор литературы показывает, что контраст снижается, а также может значительно меняться и поляризация [1, 2].

Применительно к нашей задаче, LCoS из конструктивных соображений необходимо освещать под углом 45° когерентным излучением с тремя различными длинами волн: 450-470 нм, 532-535 нм, 633-638 нм. С целью оценить изменение МТФ ПВМС был собран интерферометр Маха-Цендера. Модель используемого ПВМС – HoloEye Pluto. У данного ПВМС контраст, заявленный производителем, – 1000:1. Данный ПВМС имеет возможность гамма-коррекции, чтобы не искать линейный участок на характеристической кривой фазовой модуляции.

Схема установки и фото стенда приведены на рис. 1.

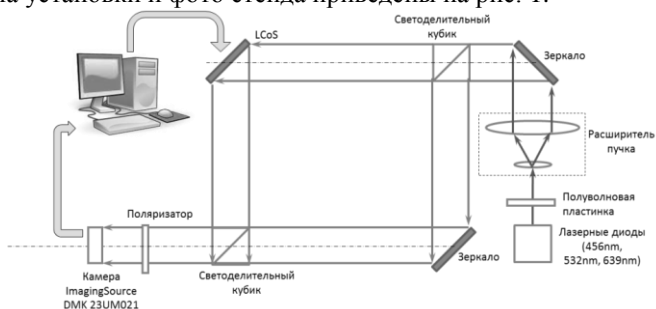


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

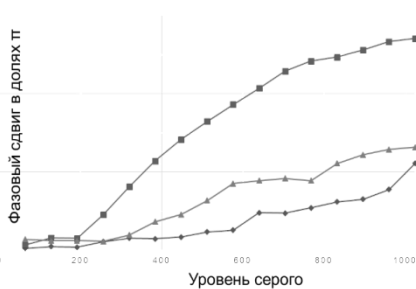


Рис. 2. Зависимости фазовой модуляции и контраста

При проведении измерений ПВМС использовался с настройками по умолчанию. На LCoS выводилось поле, разделенное на две равные части: одна часть всегда соответствовала черному (уровень серого 0), а вторая менялась от 0 до 1024 с шагом 64. В результате измерений и обработки данных получены зависимости фазовой модуляции и контраста (рис. 2).

Список литературы

1. Lizana A., et. al. Influence of the incident angle in the performance of Liquid Crystal on Silicon displays // Optics Express. 2009. V. 17. No. 10. P. 8491.
2. Kujawińska M., et. al. LCoS Spatial light modulators as active phase elements of full-field measurement systems and sensors // Metrol. Meas. Syst. 2012. V. 19. No. 3. P. 445-458.

Н.С. ИЛЬИНА, А.Ю. ПОРОЙКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**ВЫБОР СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ДИФFUЗНО ОТРАЖАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ С ВЫСОКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ
ДИАПАЗОНОМ**

Классические лазерные интерферометры (профилометры) – прецизионные устройства, с помощью которых проводятся высокоточные измерения с инструментальной погрешностью в нанометровом и субнанометровом диапазоне. Однако измерение больших перепадов высот с помощью классических профилометров невозможно, а подавляющая часть существующих интерферометров предназначена для измерения оптических деталей, а не объектов с диффузно отражающими поверхностями. В данной работе приведены анализ существующих схем лазерных интерферометров и необходимые модификации для измерения формы диффузно отражающей поверхности с высоким динамическим диапазоном.

N.S. IL`INA, A.Yu. POROYKOV

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

**SELECTION OF LASER INTERFEROMETER SCHEME
FOR MEASURING THE FORM OF DIFFUSE REFLECTIVE
SURFACE WITH HIGH DYNAMIC RANGE**

Classic laser interferometers (profilometers) are precision devices for high accurate measurements with instrumental error in the nanometer and subnanometer ranges. However, measurement of large height differences with the help of classical profiling is impossible. Also the overwhelming majority of existing interferometers are designed to measure optical parts, rather than objects with diffusely reflecting surfaces. This paper presents an analysis of the existing schemes of laser interferometers and necessary modification of them for measuring the shape of a diffusely reflecting surface with a high dynamic range.

Одним из способов определения точности фотограмметрических методов является сравнение результатов измерений этими методами с результатами измерений, полученными другими способами [1]. В качестве последних могут быть использованы варианты лазерной интерферометрии – прецизионного метода для измерения формы поверхности с высокой разрешающей способностью. Его достоинством

является связь измеряемого расстояния с длиной волны источника излучения, которая заранее известна с высокой точностью.

Чаще всего для контроля качества оптических поверхностей используются интерферометры Ньютона, Физо и Тваймана-Грина. Интерферометры Майкельсона и Маха-Цендера применяются в основном при изучении воздушных потоков. Также на основе схемы Линника выпускается микроинтерферометр, который позволяет производить измерения диффузно отражающих поверхностей [2-4]. Вне зависимости от применения одного из приведенных видов, погрешность измерений на данный момент составляет $\lambda/50 \dots \lambda/100$ при $\lambda \sim 0,5$ мкм. Хотя интерференционные методы позволяют получить результат измерений с минимальной погрешностью, но их реализация связана с рядом трудностей.

Классические интерферометры не позволяют производить измерения форм поверхностей с большим перепадом амплитуды. Однако существуют методы модификаций их схем совместно с дополнительной цифровой обработкой для расширения динамического диапазона. К таким методам относится алгоритм развертывания фазового поля измерений с помощью: эквивалентной длины волны, использования непрерывного изменения длины волны, априорной информации о величине скачка, использования допущения непрерывности производных, восстановления полной фазы, целочисленного анализа [5].

В данной работе будет приведен анализ существующих схем лазерных интерферометров, проанализированы их основные достоинства и недостатки, определены основные подходы к адаптации этих схем для измерения формы диффузно отражающей поверхности с высоким динамическим диапазоном.

Список литературы

1. Поройков А.Ю. Комплекс определения погрешности измерения формы гибкой деформируемой поверхности методом корреляции фоновых изображений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 28-39.
2. Вишняков Г.Н. и др. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116. № 1. С. 170-175.
3. Майоров Е.Е. и др. Исследование интерферометра Майкельсона с когерентно-ограниченным источником излучения для контроля диффузно отражающих объектов // Технические науки. 2018. № 4. С. 387-397.
4. Новиков Д.А. и др. Измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо // Метрология. 2012. № 12. С. 17-24.
5. Гужов В.И., Ильиных С. П. Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия. 2-е изд. М : Издательство Юрайт, 2018.

Б.А. ГРИЗБИЛ^{1,2}, Г.В. САХАДЖИ³, С.Д. ЖУРАВЛЕВ³,
Р.Ю. БОГАЧЕВ³, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

³*АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», Саратов*

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СМЕЩЕНИЙ РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются схемные решения лазерного интерферометра смещений рассеивающих объектов с цифровой записью дифракционных спекл-модулированных интерференционных картин. Представлена методика измерения относительных микросмещений элементов конструкции при нагреве до высоких температур и охлаждении. Рассматривается методика обработки цифровых интерферограмм и построения графиков микросмещений.

B.A. GRIZBIL^{1,2}, G.V. SAKHADZHI³, S.D. ZHURAVLEV³,
R.Yu. BOGACHEV³, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

³*JSC «RPE «Almaz», Saratov*

LASER SPECKLE INTERFEROMETRY OF RELATIVE TEMPERATURE DISPLACEMENT OF SCATTERING OBJECTS

Scheme solutions for laser interferometer to measure displacements of scattering objects with digital recording of diffraction speckle-modulated interference patterns are considered. Technique for measuring the relative micro-displacements of structural elements during heating to high temperatures and cooling is presented. Technique of processing an array of digital interferograms and plotting displacements is considered.

Рассеяние лазерного излучения на шероховатой поверхности сопровождается спекл-модуляцией дифракционного поля, приводящей к пространственным флуктуациям его комплексной амплитуды и интенсивности [1]. При использовании в интерферометрах в предметном и опорном плечах объектов с рассеивающими поверхностями на выходе интерферометра в результате интерференции рассеянных спекл-модулированных полей формируется спекл-модулированная интерференционная картина [2]. Фокусировка лазерных пучков на

рассеивающие поверхности позволяет увеличить размеры спеклов – расширить область корреляции поля, и наблюдать при соответствующей юстировке интерферометра полосы интерференции в пределах отдельных спеклов. В этом случае формируется спекл-модулированное интерференционное поле – спеклы модулируют по амплитуде и фазе интерференционные полосы (рис. 1а). Нами разработаны математическая и компьютерная модели лазерного спекл-интерферометра смещений рассеивающих объектов, позволяющие рассчитывать с использованием дифракционных преобразований волновых полей пространственные (рис. 1б) и временные сигналы интерферометра при относительных осевых смещениях поверхностей в плечах интерферометра.

На рис. 1в представлен временной цифровой сигнал интерферометра, наблюдаемый при относительных температурных смещениях элементов конструкции при ее нагреве до 1100 °С (восходящая часть сигнала, обусловленная интенсивным свечением), и при охлаждении (спадающая часть сигнала). Восстановленный по интерференционному сигналу график относительного смещения $g(t)$ представлен на рис. 1г.

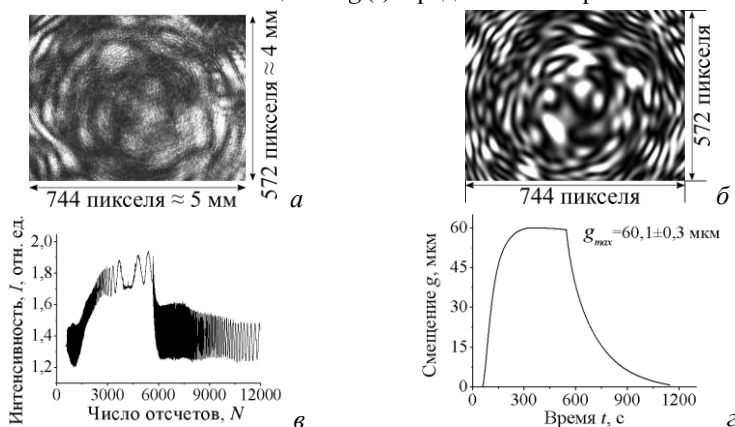


Рис. 1. Цифровые экспериментальная (а) и расчетная (б) спекл-интерферограммы; цифровая осциллограмма интерференционного сигнала нагрева и охлаждения конструкции (в); восстановленный по сигналу график относительного температурного смещения элементов конструкции (г)

Список литературы

1. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts & Company, Publishers, Englewood, 2006.
2. Горбатенко Б.Б., Лякин Д.В., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 3. С. 268-280.

П.О. ЛУКАХИН, И.Н. ПАВЛОВ, И.Л. РАСКОВСКАЯ
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО РЕФРАКЦИОННОГО
МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРАЕВОГО УГЛА
СМАЧИВАНИЯ КАПЛИ, ЛЕЖАЩЕЙ
НА НЕПРОЗРАЧНОЙ ПОДЛОЖКЕ**

Описана одна из модификаций лазерного рефракционного метода измерения геометрических параметров капель на зеркальной подложке. Создана экспериментальная установка для регистрации рефракционных изображений. Приведены результаты экспериментов по использованию лазерного рефракционного метода для измерения краевого угла смачивания капли, лежащей на непрозрачной подложке.

P.O. LUKAKHIN, I.N. PAVLOV, I.L. RASKOVSKAYA
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

**APPLICATION OF A LASER REFRACTIVE METHOD
FOR MEASURING THE CONTACT WETTING ANGLE
OF A DROP LAYING ON A NON-TRANSPARENT SUBSTRATE**

The reflective technique of the laser refractive method for measurement of geometric parameters of a droplet on a substrate is described. The experimental setup was created for the registration of refraction images. The results of experiments on the use of a laser refraction method for measuring the contact wetting angle of a drop lying on a non-transparent substrate are presented.

Актуальность измерения геометрических параметров капли, лежащей на подложке, обусловлена большим количеством применений, в которых приходится иметь дело с жидкостью в виде капель (производство наноструктур, создание структурированных поверхностей, медицинская диагностика, полиграфия). На предыдущем этапе работы [1] лазерный рефракционный метод [2] был успешно применен для измерения краевого угла смачивания капли жидкости, лежащей на прозрачной подложке. Суть метода состоит в том, что широкий коллимированный лазерный пучок, диаметром чуть больше, чем диаметр капли, проходит вертикально вверх через стеклянную подложку с находящейся на ней каплей жидкости. Так как капля является, по сути, жидкостной линзой, излучение преломляется и на экране образуется рефракционное изображение капли. Особенность

получаемого в экспериментах изображения состоит в том, что его контур имеет характерную форму, состоящую из определенного количества криволинейных участков с разными радиусами [3]. Для реализации метода была собрана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения краевого угла смачивания от момента нанесения капли на подложку до полного ее испарения. Были получены рефракционные изображения, которые были обработаны с помощью оригинальной программы.

Особенностью данного метода являлась необходимость использования прозрачной подложки. Это ограничивало область применения, поэтому в данной работе применена отражательная методика с использованием зеркальной подложки.

Установка состоит (рис. 1) из гелий-неонового лазера, фокусирующей линзы, пространственного фильтра в виде точечной диафрагмы, коллимирующей линзы, поворотной призмы, отражающей подложки, бумажного экрана и устройства регистрации изображений (фотоаппарата). Проведен эксперимент с каплями объемом 10, 15 мкл. Полученные в экспериментах изображения аналогичны изображениям, полученным при применении просвечивающей методики и позволяют восстанавливать геометрические размеры капли. Данный результат позволяет говорить о возможности применения отражательной методики лазерного рефракционного метода для измерения краевого угла смачивания капли, лежащей на отражающей подложке.

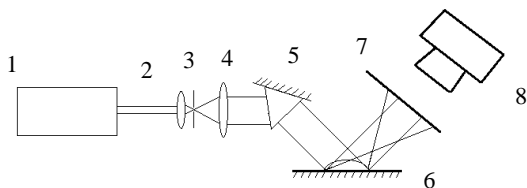


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер, 2 - коллимирующая линза, 3 - диафрагма, 4 - рассеивающая линза, 5 - поворотная призма, 6 - отражающая подложка с каплей, 7 - экран, 8 - фотоаппарат

Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. М.: Физматлит, 2008.
2. Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. Вып. 4. С. 670–681.

С.М. ЗАХАРОВ

Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука, Москва

ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ И ИЗМЕРЕНИЕ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В работе представлен сравнительный анализ сигналов артериального давления (АД) и плетизмографии (ПГ), в том числе фотоплетизмографии (ФПГ), синхронизированных во времени, а также их спектральных особенностей. Показано, насколько адекватно можно судить об АД, имея только снятые данные ПГ (ФПГ).

S.M. ZAKHAROV

Institute of Electronic Control Machines named after I.S. Brook, Moscow

PHOTOPLETYSMOGRAM AND ARTERIAL PRESSURE MEASUREMENTS IN REAL TIME

A comparative analysis of the signals of blood pressure (BP) and plethysmography (PG), including photoplethysmography (PPG), synchronized in time, as well as their spectral features, are presented in paper. It is shown how adequately one can judge about blood pressure, having only the removed PG data (PPG).

Исходные данные в работе были взяты из международной базы данных Mimic 2,3 Waveform Database Part 1/31 системы PhisioBank ATM, где представлены одновременно снятые цифровые сигналы ЭКГ, АД и ПГ [1]. Отметим, что все расчеты выполнены в среде Maple 5v4.

Проблемы одновременного мониторинга сердечного ритма в случаях АД и ПГ являются очень похожими. Тем не менее рассматриваемые сигналы отражают различные свойства функционирования сердечно-сосудистой системы, АД – механической активности а ПГ – электрической, поэтому временные формы их фрагментов могут различаться.

На рис. 1 показан отрезок десятисекундных временных записей синхронизированных сигналов АД и ПГ, относящиеся в целом к минутному интервалу. Частота дискретизации составляет 125 Гц, период сердечных сокращений ~ 0,6 с.

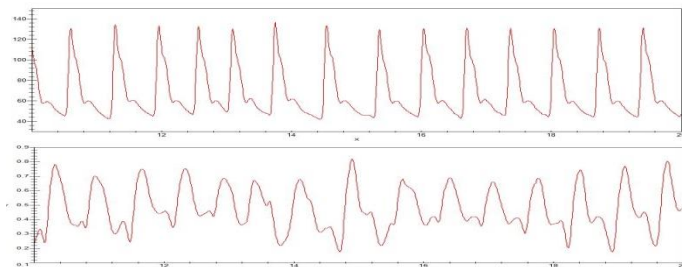


Рис. 1. Десятисекундная временная запись сигналов АД и ПГ (данные файла Mimic2wdb/3100119-0010), по оси ординат для АД отложено давление в мм рт. ст., для ПГ – мВ

На рис. 2 представлены аналоги во времени систолического АД (САД) и амплитудные отклонения в сигнале плетизмограммы. Дисперсия отклонений амплитуд АД и среднееквадратичное отклонение составляют $D = 0,00156$, $SD = 0,0395$ для АД и $D = 0,00709$, $SD = 0,0842$ для сигнала ПГ.

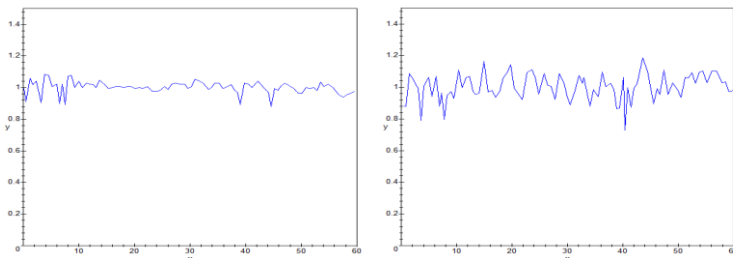


Рис. 2. Аналоги систолического АД и ПГ (амплитудные отклонения) в относительных единицах (слева – АД, справа – ПГ)

Имеется определенное временное структурное подобие сигналов АД и ПГ (соответствие временных интервалов, амплитуд). Такое же сходство имеется и в отклонениях амплитуд АД и ПГ во времени (для плетизмограмм оно более выражено). Больше структурное сходство наблюдается в интервалограммах. Это не удивительно, т.к. ранее была показана эквивалентность R-R интервалов, снятых с ЭКГ и ФПГ.

Список литературы

1. PhysioBank ATM - physionet.org/cgi-bin/atm/ATM.

С.М. ЗАХАРОВ

Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука, Москва

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА МАЛЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Представлен временной и спектральный анализ сигналов артериального давления (АД) - систолического, диастолического, пульсового, полученных в режиме реального времени и отражающих работу сердца на краткосрочных временных интервалах. В качестве временных интервалов выбиралась последовательность из ста сердечных циклов. Определены основные параметры variability. Представленная методология позволит в дальнейшем использовать выявленные особенности для диагностики различных патологий.

S.M. ZAKHAROV

Institute of Electronic Control Machines named after I.S. Brook, Moscow

ARTERIAL PRESSURE VARIABILITY ON SMALL TIME INTERVALS

The temporal and spectral analysis of blood pressure signals (systolic, diastolic, and pulse blood pressure), obtained in real time and reflecting the work of the heart in short-term time intervals, is presented. A sequence of one hundred heart cycles was chosen as time intervals. The basic parameters of variability are determined. The presented methodology will allow further use of the identified features for the diagnosis of various pathologies.

В настоящей работе представлена методология, позволяющая исследовать АД на произвольных временных интервалах. Для определенности временной интервал выбран в пределах ста сердечных сокращений. Получены зависимости от времени систолического (САД), диастолического (ДАД), пульсового (ПАД) артериального давления (АД), а также соответствующих интервалограмм. Рассчитаны основные параметры variability: дисперсии, среднеквадратичные отклонения, коэффициенты вариации. Для САД, ДАД и ПАД построены скатерограммы. Представлен спектральный анализ всех временных характеристик АД. Проведенный анализ сигналов АД дает дополнительную информацию, которую можно использовать в целях диагностики артериальной гипертензии.

В качестве исходных данных в работе выбиралась международная база данных MIMIC II/III Waveform Database, part 1 (mimic2wdb/31), в частности, цифровая запись 3100033_0003, полученная в режиме реального времени [1]. Отметим, что все вычисления проводились в пакете Maple 5V4.

На рис. 1 представлены амплитудные изменения сигналов АД, относящиеся к систолическому, диастолическому и пульсовому давлению, а также скатерограмма.

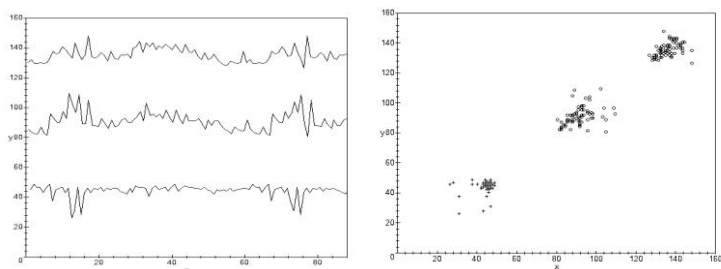


Рис. 1. Зависимости во времени систолического (САД) (верхняя кривая), диастолического (ДАД) (нижняя кривая) и пульсового (ПАД) (промежуточная кривая), а также скатерограмма, по оси абсцисс отложено либо время (сек), либо – АД (мм рт. ст.)

Временная зависимость АД, полученная в режиме реального времени, обладает массой информационных свойств. Прежде всего, это относится к зависимостям от времени систолического, диастолического, пульсового давлений, временным интервалам, относящимся к данным видам давлений, временам подъема и спада АД, основным характеристикам variability. То же самое справедливо в отношении спектральных свойств. В целом АД в спектральной области также обладает в той или иной степени свойством упорядоченности или разупорядочности частотных компонент.

Список литературы

1. PhysioBank ATM - physionet.org/cgi-bin/atm/ATM.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Т.Д. ТЫНЫШОВА

Институт физико-технических проблем НАН Кыргызской республики, Бишкек

УМЕНЬШЕНИЕ ОБЪЕМА ВВОДИМЫХ ДАННЫХ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Рассмотрена математическая модель расфокусировки изображений некогерентной оптической системой с целью использования ее в процессе автоматизированной обработки интерферограмм, как довольно эффективный фильтр высоких частот. Показана высокая эффективность такого способа предварительной обработки в случае сложных интерферограмм, в которых присутствуют одновременно и высокочастотные и низкочастотные составляющие (муар).

Yu.K. ISMANOV, T.D. TYNYSHOVA

Institute of Physical and Technical Problems and Material Science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

REDUCING THE VOLUME OF INPUT DATA DURING COMPUTER PROCESSING OF INTERFEROGRAMS

A mathematical model of the defocusing of images by an incoherent optical system is considered with the aim of using it in the process of automated processing of interferograms, as a rather effective high-pass filter. The high efficiency of this method of pretreatment in the case of complex interferograms, in which both high-frequency and low-frequency components (moire) are present, is shown.

Компьютерная обработка интерферограмм – это возможность получать информацию об исследуемой среде в реальном масштабе времени. Однако, при обработке всей этой информации, особенно, если требуется одновременно сравнивать интерферограммы исследуемой фазовой среды в различные моменты времени, приходится сталкиваться с огромным объемом данных. Возникает необходимость резкого сокращения количества вводимых в компьютер данных, не теряя при этом качества информации, а также имея возможность синтезировать весь исходный объем данных об интерферограммах.

В нашем исследовании мы предлагаем сократить объем вводимых данных за счет расфокусировки интерферограмм. Теоретически и экспериментально было показано, что расфокусировка сопровождается выделением информативных элементов с реверсированием контраста

только в некогерентных оптических системах. При этом, в зависимости от тонкой структуры изображения, для выделения информативных фрагментов могут потребоваться различные степени расфокусировки. Поэтому для использования этого метода в когерентном оптическом корреляторе необходимо предварительно расфокусировать изображение в некогерентных оптических системах.

В данной работе предложена математическая модель оптической системы, позволяющей осуществлять процесс расфокусировки изображений. Процесс расфокусировки осуществляется до тех пор, пока влияние высокочастотной составляющей интерференционной картины становится несущественной.

На основе предложенной математической модели была разработана компьютерная модель, результаты работы которой представлены на рис. 1.

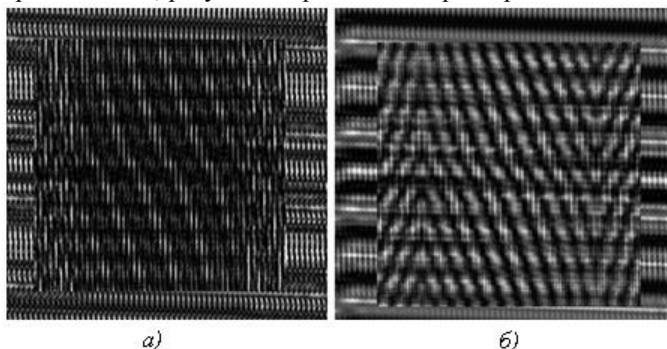


Рис. 1. Интерферограмма линзы с наличием сферической аберрации: без расфокусировки (а), с расфокусировкой (б)

Список литературы

1. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot Interferometer // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4149. P. 213-220.
2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5144. P. 606-610.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Кулмурзаев Н.М. Голографическая интерферометрия, использующая два опорных пучка // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2018. Т. 18. № 4. С. 7-10.
4. Исманов Ю.Х., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3 (57). С. 171-178.
5. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия НАН КР. 2015. № 2. С. 20-23.
6. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2015. №4(50). С. 194-199.

О.А. ИЗОТОВА¹, В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МИКРОСКОП С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ПОЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Представлена экспериментальная схема оптического микроскопа с добавочным интерференционным модулем, позволяющим получать интерференционные изображения микрообъектов в частично-когерентном излучении путем пространственной фильтрации волнового поля в одном из плеч модуля.

O.A. IZOTOVA¹, V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

²*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

INTERFERENCE MICROSCOP WITH SPATIAL FILTRATION OF IMAGE FIELD IN SPATIALLY COHERENT LIGHT

Experimental setup of the optical microscope with additional interference module with spatial filtration in the reference field is presented, which provides microobjects interference images formation of in partially coherent light.

Существует ряд схемных решений для интерференционной микроскопии [1], определяемых поставленными целями и задачами.

В данной работе предложена экспериментальная схема интерференционного микроскопа, представляющего собой обычный оптический микроскоп с добавочным интерференционным модулем (рис. 1). Данный интерференционный модуль располагается по ходу лучей света в пространстве за изображением объекта, формируемым микроскопом. Задачей интерференционного модуля является разделение исходящего из оптического микроскопа пучка света на опорный и объектный пучки для формирования интерференционного изображения. Важной особенностью данного интерференционного модуля является реализация с помощью телескопической линзовой системы пространственно-частотной фильтрации оптического поля для формирования опорного пучка в интерференционном модуле с помощью

пинхола, совмещенного с опорным зеркалом, расположенным в пространственно-частотной плоскости системы. Внесение фазовой задержки между опорным и объектным пучками осуществляется путем пошагового перемещения опорного зеркала вдоль оптической оси, что позволяет получать набор интерференционных изображений с определенным фазовым сдвигом и восстанавливать комплексную амплитуду поля изображения методом фазовых шагов. Использование протяженного источника освещения направлено на уменьшение когерентных шумов и подавление спекл-эффекта в интерференционном изображении, возникающих при использовании лазерного источника. Разработанная оптическая схема интерференционного микроскопа позволяет получать интерференционные изображения исследуемых микрообъектов, в том числе и фазовых, в частично-когерентном свете, а также предоставляет возможность реализации метода записи и восстановления гиперспектральных голографических изображений микрообъектов при использовании широкополосного частично когерентного излучения [2], что расширяет границы применимости данной оптической системы.

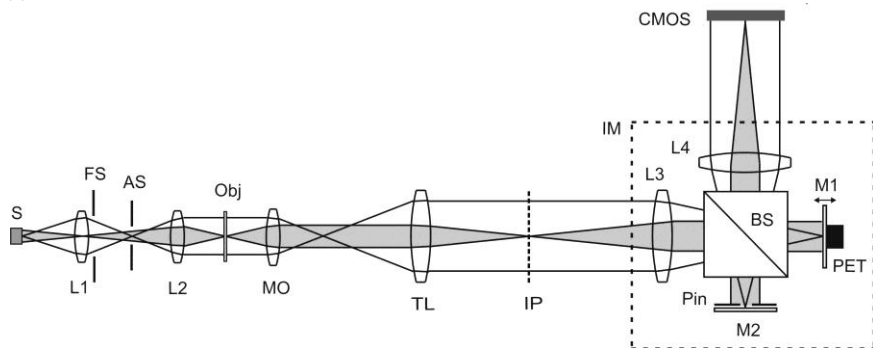


Рис. 1. Оптическая схема микроскопа с интерференционным модулем:
 S - протяженный некогерентный источник света, L1 - коллекторная линза,
 L2 - конденсор, FS, AS - полевая и апертурная диафрагмы, Obj - объект,
 MO - микрообъектив, TL - тубусная линза, IP - плоскость изображения,
 IM - интерференционный модуль: L4, L5 - линзы телескопической системы,
 M1, M2 - зеркала, Pin - пространственный фильтр, PET - пьезоэлектрический преобразователь, CMOS - цифровая матрица фотокамеры

Список литературы

1. De Groot P. // *Advanced in Optics and Photonics*. 2015. V. 7(1). P. 1.
2. Каленков Г.С., Каленков С.Г., Штанько А.Е. // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45(4). С. 333.

А.В. БЕЛАШОВ^{1,2}, А.А. ЖИХОРЕВА¹, Т.Н. БЕЛЯЕВА³,
Е.С. КОРНИЛОВА³, А.В. САЛОВА³, И.В. СЕМЕНОВА¹,
О.С. ВАСЮТИНСКИЙ¹

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

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

³*Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРЫВА МЕМБРАНЫ ЖИВЫХ КЛЕТОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Представлены результаты разработки метода автоматической сегментации клеток линии HeLa на фазовых изображениях и определения их оптических и морфологических параметров. В работе было установлено, что уменьшение таких характеристик клетки как сухая масса, максимальный фазовый набег, а также средний фазовый набег внесенный клеткой в волновой фронт свидетельствует о разрыве клеточной мембраны. При этом скорость изменения данных характеристик коррелирует со степенью повреждения клетки.

A.V. BELASHOV^{1,2}, A.A. ZHIKHOREVA¹, T.N. BELYAEVA³,
E.S. KORNILOVA³, A.V. SALOVA³, I.V. SEMENOVA¹,
O.S. VASUTINSKI¹

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

²*ITMO University, Saint-Petersburg*

³*Institute of Cytology of the RAS, Russia*

HOLOGRAPHIC INVESTIGATION OF CELLULAR MEMBRANE RUPTURE AS A RESULT OF PHOTODYNAMIC TREATMENT

The report presents the recently developed algorithm for automatic segmentation of HeLa live cells at the phase images and methodology for their optical and morphological parameters calculation. It was found that decrease of cellular dry mass, maximum phase shift and average phase shift indicates rupture of cellular membrane. At the same time dynamics of the cells parameters variation is related with rate of cellular membrane damage.

В настоящее время цифровая голографическая микроскопия широко используется при исследовании многих внутриклеточных процессов.

Среди основных из них можно выделить работы посвященные изучению активности нейронов [1], определению морфологических характеристик красных кровяных телец [2], а также исследованию механизмов клеточной гибели [3]. Как было показано в наших предыдущих работах, некроз живых клеток может быть ассоциирован с уменьшением фазового набега, вносимого клетками в проходящий волновой фронт [4].

Данная работа посвящена исследованию динамики изменения данной величины при различных параметрах фотодинамического воздействия. Для получения статистически значимых результатов зачастую требуется провести сегментацию большого количества клеток. С целью упрощения процедуры обработки экспериментальных данных был разработан алгоритм автоматической сегментации клеток на фазовых изображениях. На первом этапе алгоритма производился поиск участка изображения размером 200x200 пикселей с наименьшей вариацией данной величины. Этот участок использовался для нормировки фазовой картины. После этого выполнялся поиск локальных максимумов, соответствующих искомым клеткам. Области данных максимумов итерационно расширялись, пока средний набег добавляемого участка не становился сопоставим со средним фазовым набегом области нормировки фазы.

Такая автоматическая сегментация была применена для обработки экспериментальных данных по мониторингу динамики изменения фазовых изображений клеток линии HeLa после фотодинамического воздействия. В ходе работы было установлено, что скорость протекания процесса некроза напрямую связана со скоростью фотосенсибилизированной генерации синглетного кислорода. При этом, даже при сохранении суммарной дозы фотодинамического воздействия увеличение плотности мощности лазерного излучения ведет к значительному ускорению процессов некроза. Использование же предельно низкой интенсивности лазерного излучения (менее 3-4 мВт/см²) при той же суммарной дозе фотодинамического воздействия в вовсе не приводит к запуску механизмов клеточной гибели, что вероятно связано с действием внутриклеточных защитных механизмов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00364 .

Список литературы

1. Pavillon N., et. al. // Journal of biophotonics. 2010. V. 3 (7). P. 432-436.
2. Rappaz B., et. al. // Blood Cells, Molecules, and Diseases. 2009. V. 42(3). P. 228-232.
3. Khmaladze A. et. al. // Journal of Structural Biology. 2012. V. 178 (3). P. 270-278.
4. Belashov A.V., et. al. // International Conference Laser Optics (ICLO). 2018. P. 555.

К.И. ЛЬВОВА¹, А.С. ПЕРЕВОЗНИКОВА^{1,2}, А.Н. ПУТИЛИН²,
А.В. МОРОЗОВ^{2,3}, Е.Г. МАЛИНОВСКАЯ³

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

³ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТРОЙСТВА СЛЕЖЕНИЯ ЗА НАПРАВЛЕНИЕМ ВЗГЛЯДА НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДА И ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Авторы предлагают оптическую систему устройства слежения за направлением взгляда на основе дисперсионных свойств дифракционного оптического элемента, работающую в волноводном режиме. В работе продемонстрированы результаты расчета и моделирования устройства.

K.I. LVOVA¹, A.S. PEREVOZNIKOVA^{1,2}, A.N. PUTILIN²,
A.V. MOROZOV^{2,3}, E.G. MALINOVSKAYA³

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Samsung R&D Institute, Moscow

EYE TRACKING DEVICE OPTICAL SYSTEM BASED ON WAVEGUIDE AND DISPERSIVE PROPERTIES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT

Authors propose eye tracking device optical system, which works in waveguide mode and uses dispersion properties of diffraction optical element. Results of diffraction element design and layout of waveguide optical system are demonstrated.

Системы, позволяющие в реальном масштабе времени регистрировать параметры, связанные с определением направления визирования глаз человека, в настоящее время имеют широкое применение. Такие системы встраиваются в очки виртуальной и дополненной реальности, используются в медицинских исследованиях [1], выступают в роли коммуникационных систем для полностью парализованных людей; также с их помощью проводятся маркетинговые исследования.

Целью работы является поиск, разработка и исследование оптической системы для устройства слежения за направлением взгляда на основе дисперсионных свойств дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и

волноводной оптики, работающей на принципе полного внутреннего отражения (ПВО) света от границы раздела двух сред.

При исследовании современных устройств слежения за направлением взгляда, основанных на видеорегистрации положения зрачка (следовательно, оси визирования) глаза несколькими камерами и последующей цифровой обработке, был сделан вывод, что такой принцип работы прост в реализации, но несовершенен в эксплуатации.

Авторы предлагают оптическую схему устройства, в основе которой лежат следующие ключевые составляющие: ДОЭ, обладающий дисперсионными свойствами [2], источник излучения с широким спектральным составом и волновод. Реализация оптической схемы устройства слежения за направлением взгляда показана на рис. 1.

Использование излучения инфракрасного диапазона длин волн обеспечивает независимость системы от посторонней засветки, однако она ограничивается набором длин волн полихроматического источника. В рассмотренном примере реализации системы получено угловое рабочее поле системы, которое составляет $\pm 10^\circ$, в пределах которого возможно определение направления взгляда.

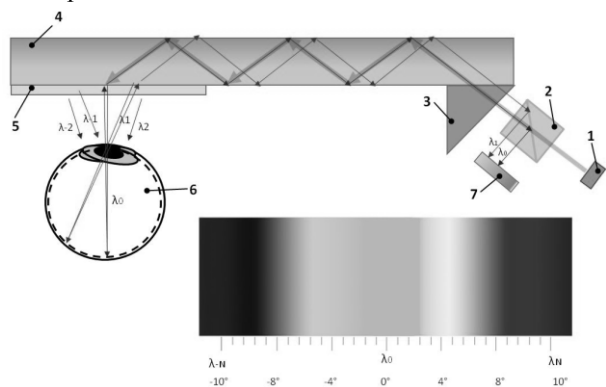


Рис. 1. Принципиальная схема оптической системы устройства слежения за направлением взгляда: 1 - полихроматический источник излучения; 2 - светоделительный кубик; 3 - призма; 4 - волновод; 5 - дифракционный оптический элемент; 6 - глаз; 7 - спектрометр

Список литературы

1. DeHoog E., Holmstedt J., Aye T. Field of view of limitations in see-through HMD using geometric waveguides // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. P. 5924-5930.
1. Солодков А.С., Сологуб Е.Б. Физиология человека, Общая, Спортивная, Возрастная. Учебник. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Олимпия Пресс, 2005.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ

Институт физико-технических проблем НАН Кыргызской республики, Бишкек

О ВЛИЯНИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ НА ПРОЦЕСС ПРОЯВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ

Работа посвящена изучению влияния скоростного нагрева на информационные свойства фототермопластического (ФТП) носителя. Показано, что длительность воздействия проявляющего импульса зависит от мощности нагревающего излучения лазера, что дает возможность оптимизировать процесс записи посредством выбора момента выключения нагревающего источника. Приведены результаты расчета такой зависимости.

N.K. DZHAMANKYZOV, Yu.K. ISMANOV

Institute of Physical and Technical Problems and Material Science of NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek

ON THE EFFECT OF THE TEMPERATURE GRADIENT OF A PHOTOTHERMOPLASTIC FILM ON THE PROCESS OF HOLOGRAM DEVELOPMENT

The work is devoted to the study of the effect of high-speed heating on the information properties of a photothermoplastic (FTP) carrier. It is shown that the duration of exposure of the developing pulse depends on the power of the heating radiation of the laser, which makes it possible to optimize the recording process by choosing the moment of switching off the heating source. The results of the calculation of this dependence are given.

Условие для проявления градиента температуры по толщине слоя ФТП пленки [1-5] можно представить в следующем виде

$$\frac{dT_1}{dz} = \frac{d\theta_1}{dt} \left(\frac{h_1}{a_1} \right) e^{\psi z} \Phi^* \left(\frac{1}{\psi} \right), \quad (1)$$

где $\frac{d\theta_1}{dt}$ – скорость нагрева ФТП слоя, h_1 и a_1 – толщина и температуропроводность ФТП слоя, ψ – функция, зависящая от параметров среды и определяющая распределение энергии между пленками и подложкой, Φ^* – функция ошибок. Соотношение (1)

позволяет найти пороговую длительность облучения t_{thr} , при которой начинает возникать или исчезать градиент температуры по толщине ФТП пленки. Если длительность нагревающего излучения $t < t_{thr}$, то этот диапазон является диапазоном высокого темпа нагрева. В данном случае в пленке возникает градиент температуры. Если $t > t_{thr}$, то это диапазон низкого темпа нагрева, в котором градиент температуры не возникает. Таким образом, образование градиента температуры по толщине ФТП слоя обуславливается длительностью нагревающего излучения и определяется исключительно теплофизическими свойствами материалов и геометрией носителя, независимо от мощности нагревающего источника. Это связано с тем обстоятельством, что за время действия короткого импульса проводящий слой быстро нагревается, благодаря своим хорошим оптическим и теплофизическим свойствам, а нагрев ФТП слоя в течение этого времени определяется его теплопроводностью, которая намного ниже, чем у проводящего слоя.

Установлено, что наиболее качественная запись на ФТП средах при $t < t_{thr}$ формируется после выключения проявляющего импульса при достаточно высокой мощности источника нагрева. Таким образом, регулируя мощность источника, можно установить режим, при котором получается наиболее качественная запись голограмм на ФТП носителе.

Список литературы

1. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Температурная зависимость дифракционной эффективности голограмм, записанных на фототермопластический носитель // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 586-587.
2. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Распределение температурных полей в фототермопластической среде при записи голограмм // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 282-283.
3. Исманов Ю.Х., Кулмурзаев Н.М., Тургунбаев Н.А. Регистрирующие среды для голографии и радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2014. №1(43). С. 83-87.
4. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. No. 12. P. 7039-7044.
5. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесщелевой радужной голограммы когерентной волной // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.

Н.Д. ВОРЗОВОВА, П.П. СОКОЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Рассмотрен голографический метод получения объектов с произвольной трехмерной формой поверхности. Исследованы факторы, определяющие свойства трехмерных объектов и требования к условиям их формирования.

N.D. VORZOBOVA, P.P. SOKOLOV
ITMO University, Saint Petersburg

FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY THE METHOD OF HOLOGRAPHIC 3D-PRINTING

The holographic method of obtaining objects with an arbitrary three-dimensional surface shape is considered. The factors determining the properties of three-dimensional objects and the requirements to the conditions of their formation are investigated.

Рассмотрен метод получения трехмерных объектов, основанный на проекции голографического изображения формируемого объекта в объем фотополимеризующегося материала (рис. 1) и отображении проектируемого изображения за счет ограничения полимеризации вне области наибольшей резкости [1]. Преимуществом метода относительно аддитивных технологий 3D-печати является исключение последовательного синтеза трехмерного объекта – весь объект формируется в результате однократного светового воздействия.

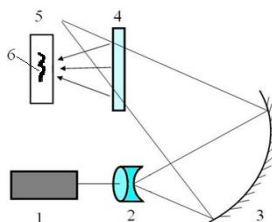


Рис. 1. Принцип голографической 3D-печати: 1 - лазер, 2 - микрообъектив, 3 - сферическое зеркало, 4 - проектирующая голограмма, 5 - фотополимеризующийся материал, 6 - восстановленное действительное изображение объекта

Выявлены и исследованы факторы, определяющие отображение в объеме материала проектируемого голографического изображения. Исследовано влияние соотношений длин волн и геометрических параметров схемы записи проектирующей голограммы и проекции изображений на размерные характеристики трехмерных объектов. Установлено, что при различии условий записи голограммы и проекции изображений наибольшие размерные изменения (в плоскости и по глубине изображения) наблюдаются при увеличении длины волны восстанавливающего (формирующего) излучения относительно длины волны записи проектирующей голограммы. Уменьшение длины волны формирующего излучения, в том числе, использование излучения в УФ-области спектра, благоприятной с точки зрения спектральной чувствительности перспективных материалов и реализации метода в незатемненных помещениях, приводит к уменьшению размеров формируемых объектов и уменьшению размерных искажений по глубине.

Установлена связь материальных и экспозиционных параметров:

$$I_{\text{изобр.}} e^{-k_{\lambda} T_{\text{изобр.}}} t_{\text{эксп.}} \geq E_{\text{порог.}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{изобр.}} = \frac{P \eta \alpha}{S}, \quad (2)$$

где $I_{\text{изобр.}}$ – интенсивность излучения в восстановленном изображении (без учета поглощения в слое); k_{λ} – показатель поглощения материала; $T_{\text{изобр.}}$ – толщина слоя от его поверхности до области локализации изображения; $t_{\text{эксп.}}$ – длительность экспонирования; $E_{\text{порог.}}$ – пороговое значение энергии полимеризации (чувствительность материала); P – выходная мощность лазера; η – дифракционная эффективность проектирующей голограммы; α – коэффициент потерь; S – площадь формируемого объекта.

На основании полученных зависимостей определены требования к создаваемому поглощению формирующего излучения в объеме материала (с целью ограничения полимеризации в объеме материала за областью наибольшей резкости проектируемого изображения), длительности экспонирования, локализации проектируемого изображения, а также глубине профиля формируемого трехмерного объекта. Определены условия получения объектов с трехмерной формой поверхности, соответствующей форме поверхности исходных объектов в результате однократного экспонирования материала.

Список литературы

1. Vorzobova N.D., et. al. // Optics and Spectroscopy. 2015. V. 119. P. 1034-1037.

Е.Ф. ПЕН

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЁТКИ В КАЧЕСТВЕ ПАССИВНЫХ ТРЕКЕРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведён анализ параметров голографических решёток, обеспечивающих повышение эффективности приёма солнечного излучения в режиме пассивных трекеров. Учтены изменения направления солнечного излучения, совокупные спектральные характеристики Солнца и фотоэлемента, оптические свойства материалов, используемых для изготовления решёток.

E.F. PEN

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

HOLOGRAPHIC GRATINGS AS PASSIVE TRACKERS OF SOLAR RADIATION

Analysis of the parameters of holographic gratings, providing an increase in the efficiency of receiving solar radiation in the passive tracker mode, is carried out. Direction of solar radiation, the spectral characteristics of the Sun and the photocell, and optical properties of materials used to make the gratings are taken into account.

Актуальным направлением прикладной оптики является разработка концентраторов солнечного излучения [1, 2]. Важный раздел исследований в этой области – обеспечение постоянства поступления солнечного излучения на поверхность фотоэлектрических панелей. Наиболее эффективно эта задача решается с помощью активных трекеров [3]. Но эти устройства сложны по конструкции и в управлении, а для солнечных панелей, вмонтированных в окна, просто неприменимы. В этом случае могут быть использованы голографические дифракционные решётки. В [2] проведен анализ эффективности таких решёток в качестве пассивных трекеров, однако, рассмотрена лишь одна конфигурация предметного и опорного пучков, лежащих в меридиональной плоскости. При этом азимутальная угловая селективность решёток минимальна, а сезонная зависимость их эффективности, наоборот, максимальна. Вместе с тем не изучены возможности решёток при иных конфигурациях указанных пучков, в частности, их расположение в азимутальном направлении. Цель данной работы – исследование голографических решёток с конфигурациями предметного и опорного пучков,

обеспечивающими повышение эффективности приёма солнечного излучения.

Изучен случай, когда при использовании решётки H сигнал фотоэлемента P состоит из сигналов P^d и P^u , обусловленных воздействием дифрагированного пучка \vec{k}^d , направленного по нормали к плоскости фотоэлемента, и прошедшего без дифракции пучка \vec{k}^u , наклонённого к этой плоскости на углы падения восстанавливающего пучка \vec{k}^i (рис. 1):

$$P^u(\psi) = \begin{cases} \alpha I_0(1-\eta(\psi))\sin(\psi)\cos(\delta^r), & \psi < \pi/2 \\ \alpha I_0(1-\eta(\psi+\pi/2))\sin(\psi)\cos(\delta^r), & \psi > \pi/2 \end{cases},$$

$$P^d(\psi) = \alpha I_0\eta(\psi), \quad P^u(\psi) + P^d(\psi) = P(\psi).$$

Зависимость сигнала P от азимутального угла ψ показана на рис. 2: кривая 1 – при использовании решётки, кривая 2 – без неё.

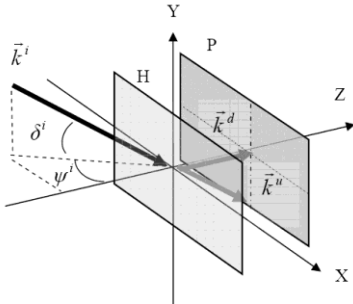


Рис. 1. Конфигурация падающего, дифрагированного и прошедшего пучков относительно решётки и фотоэлемента

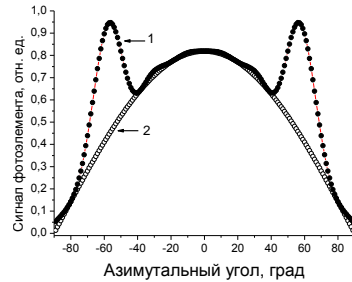


Рис. 2. Зависимость сигнала фотоэлемента от азимутального угла при использовании решетки (1); без неё (2)

Видно, что за счёт вклада решёток сигнал фотоэлемента резко возрастает в интервалах азимутальных углов $-70 \div -40^\circ$ и $40 \div 70^\circ$. Вследствие этого увеличивается и суммарный сигнал, усреднённый по всему диапазону азимутальных углов. Подбором параметров решёток можно расширить на этот интервал и увеличить сигнал фотоэлемента примерно на 25 %.

Список литературы

1. Collados M.V., et. al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 59. P. 130-140.
2. Castro J.M., et. al. // Applied optics. 2010. V. 49. No. 5. P. 858-870.
3. Kostuk R.K., et. al. // AIP Conference Proceedings. 2011. V. 1407. P. 137-140.

А.С. ПЕРЕВОЗНИКОВА^{1,2}, К.И. ЛЬВОВА¹, С.С. КОПЁНКИН^{2,3},
В.В. ДРУЖИН¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

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

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

РАСЧЁТ СВЕТОСИЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЗАПИСИ ВНЕОСЕВЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Описана методика расчёта светосильных объективов-ахроматов на минимум сферической аберрации для длин волн излучения лазеров, участвующих в записи голографических оптических элементов (479, 532 и 633 нм). Приведена схема записи внеосевых голографических элементов, в опорную и предметную ветви которой установлены рассчитанные светосильные объективы с целью увеличения заднего апертурного угла.

A.S. PEREVOZNIKOVA^{1,2}, K.I. LVOVA¹, S.S. KOPENKIN²,
V.V. DRUZHIN¹

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³MIREA – Russian Technological University, Moscow

HIGH-APERTURE LENSES DESIGNING AND THEIR APPLICATION IN RECORDING SET-UPS OF THE OFF-AXIS HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS

Presents high-aperture lenses, which are designed to satisfy minimum spherical aberration and achromatization requirements. Presents recording arrangement of off-axis holographic optical elements, where designed high-aperture lenses are used in reference and object branches to increase image-side aperture angle.

Светосильные объективы применяют для записи внеосевых голографических оптических элементов (ГОЭ), включая их в оптические схемы опорной и предметной ветви с целью увеличения заднего апертурного угла.

Целью работы является расчёт светосильных объективов с увеличенным значением заднего апертурного угла для опорной и предметной ветви схемы записи ГОЭ, в которых исправлены сферическая аберрация и хроматизм положения для обеспечения наилучших условий работы цветного ГОЭ [1]. Кроме того, объективы должны иметь простую

конструкцию для исключения паразитных засветок и бликов, которые могут оказывать нежелательное воздействие при записи голограмм.

Двухлинзовый склеенный объектив (ДСО) обладает двумя абберационными параметрами (углы первого вспомогательного луча α_2 и α_3 , рис. 1) и обеспечивает исправление хроматизма и сферической абберации [2]. При абберационном расчёте ДСО считаются заданными входной зрачок D , задний апертурный угол σ' , комбинация марок оптических стекол (коэффициент дисперсии v , показатель преломления n , $\mu = 1/n$), значения хроматизма положения $C = 0$ и сферической абберации $P = 0$. Система уравнений (1) решается относительно углов α , которые связаны с радиусами кривизны r линз формулой (2).

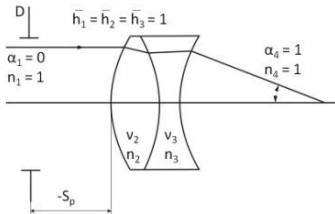


Рис. 1. Принципиальная схема ДСО

$$\begin{cases} C = \sum \frac{\Delta\alpha}{\Delta v} \Delta \left(\frac{1-\mu}{v} \right) = 0 \\ P = \sum \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta v} \right)^2 \Delta \mu \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$r = \frac{\Delta n}{\Delta \alpha} f' \quad (2)$$

Полученные в результате расчета конструктивные параметры объективов используются в качестве начальной системы для дальнейшей оптимизации.

Рассчитанные объективы участвуют в формировании предметного и опорного пучков, обеспечивая высокое значение заднего апертурного угла в схеме записи (рис. 2), что приводит к увеличению поля зрения внеосевых ГОЭ.

- 1 – объектив 1
- 2 – объектив 2
- 3 – ГОЭ

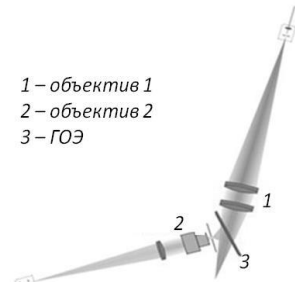


Рис. 2. Схема записи внеосевых ГОЭ

По представленному методу были рассчитаны и изготовлены объективы, которые применяются в схеме записи внеосевых ГОЭ. В дальнейшем планируется проверка качества реального качества объективов.

Список литературы

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
2. Слюсарев Г. Г. Расчёт оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.

С.С. АНУФРИК, А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

**МИНИМИЗАЦИЯ АБЕРРАЦИЙ, ВНОСИМЫХ СИСТЕМОЙ
ЗАПИСИ И ПОДЛОЖКОЙ НОСИТЕЛЯ ГОЛОГРАММЫ,
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ
ИНТЕРФЕРОГРАММ СДВИГА**

Теоретически доказано, что при использовании одноэкспозиционной голограммы исключаются только оптические неоднородности подложки, а двухэкспозиционной голограммы – дополнительно и aberrации системы регистрации голограмм.

S.S. ANUFRIK, A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

**MINIMIZATION OF THE ABERRATIONS BROUGHT
BY SYSTEM OF RECORD AND SUBSTRATE
OF THE CARRIER OF THE HOLOGRAM, AT FORMATION
HOLOGRAPHIC SHEARING INTERFEROGRAM**

It is theoretically proved that at use of the one-exposition hologram is excluded only optical heterogeneity of a substrate, and the two-exposition hologram - in addition and aberrations of system of registration of holograms.

Интерферометрия сдвига в отличие от двулучевой интерферометрии менее чувствительна к вибрациям оптических элементов устройства формирования интерферограмм и более проста в реализации.

В данной работе рассмотрены способы минимизации оптических искажений подложек носителя голограммы, а также aberrаций системы записи голограммы при формировании интерферограмм бокового сдвига с использованием волновых фронтов, восстановленных с голограммы. Эти способы значительно расширяют возможности голографической интерферометрии бокового сдвига особенно при использовании низкокачественных подложек для регистрируемых голограмм, а также снижают требования к aberrационным характеристикам оптических систем записи голограмм.

Показано, что возникновение aberrаций оптической системы записи голограмм в основном связано с различием путей прохождения объектной

и опорной волны через оптические элементы голографического интерферометра, а также с несовершенством различных оптических элементов (линз, объективов, светоделителей и т. п.). Рассмотрены и теоретически проанализированы различные случаи формирования интерферограмм сдвига с исключением оптических искажений при использовании одноэкспозиционной и двухэкспозиционной голограмм.

Показано, что для случая одноэкспозиционной голограммы можно исключить только оптические искажения, вносимые подложкой голограммы. Использование двухэкспозиционных голограмм позволяет получать интерферограммы бокового сдвига исследуемого объекта с полной компенсацией аберраций, как системы регистрации голограмм, так и неоднородностей подложки ее носителя. Однако этот вариант голографической интерферометрии бокового сдвига требует использования двухэкспозиционной регистрации голограммы с изменением несущей частоты полос и, соответственно, более трудоемок в реализации, чем с использованием одноэкспозиционной регистрации. Поэтому отдавать ему предпочтение следует в случаях аберраций системы регистрации голограмм соизмеримых с величиной полезного измеряемого сигнала.

Применение рассмотренного подхода для минимизации аберраций в методе голографической интерферометрии бокового сдвига может обеспечить снижение влияния систематической составляющей погрешности измерений при исследовании фазовых объектов в случае использования низкокачественных подложек носителей голограмм и оптических систем их регистрации с дешевой оптикой.

Предложенные способы минимизации аберраций были применены для оценки качества нанесения тонких пленок светочувствительных эмульсий толщиной от 10 до 100 мкм на клиновидные стеклянные подложки дифракционных оптических элементов, а также для измерительного контроля качества гибридных активных сред представляющих активные среды для лазеров на красителях. В эксперименте удалось снизить систематическую погрешность измерений при обработке интерферограмм сдвига более чем на порядок

А.П. ХУРЧАК, А.А. ЛАТУШКИН, А.В. БЕЛАШОВ^{1,2},
Н.В. ПЕТРОВ¹

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

ОСЕВАЯ ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРООБРАСТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Представлены результаты исследования микрообрастания методом осевой цифровой голографии. Исследовался процесс микрообрастания покровных стёкол в условиях, имитирующих морскую среду. Из голограмм восстановлены изображения формирующих обрастание на начальной стадии одноклеточных диатомовых водорослей, прикрепившихся к исследуемой поверхности.

A.P. KHURCHAK, A.A. LATUSHKIN, A.V. BELASHOV^{1,2},
N.V. PETROV¹

Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Sebastopol

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

DIGITAL IN-LINE HOLOGRAPHY FOR OPTICAL MATERIALS BIOFOULING IN WATER ENVIRONMENT

The results of the study of biofouling by inline digital holography are presented. The process of biofouling of cover glasses was studied under conditions simulating the marine environment. Images of unicellular diatom algae attached to the studied surface forming fouling at the initial stage were reconstructed from the holograms.

Создание и использование автономных систем долговременного мониторинга водной среды является перспективным направлением в океанологии. Существующие в настоящее время системы позволяют непрерывно получать комплексную информацию о состоянии различных водных акваторий, а также обеспечивают информацией, необходимой для валидации спутниковых данных. В состав таких систем входит множество оптических датчиков, подверженных биообрастанию. Биообрастание существенно снижает качество измерений. В связи с этим, в мире ведутся активные работы по расширению знаний о самом процессе биообрастаний, а также разрабатываются методы борьбы с ним.

Цель настоящей работы состояла в апробации метода цифровой голографической микроскопии под задачи исследования микрообрастания на оптических материалах в морской среде. Безлинзовая оптическая установка для записи голограмм состояла из: источника света (He-Ne лазер 632 нм), фильтра пространственных частот 10 нм, КМОП-камеры VEI-830 (2 Мр, 1280×1024). Установка была собрана вертикально, что позволяло размещать исследуемый образец непосредственно над светочувствительной матрицей камеры.

Для имитации естественной морской среды использовался аквариум объемом 20 л с аэрацией и подсветкой. В аквариум помещались искусственные рифовые конструкции, представляющие собой рамки с закрепленными в них покровными стеклами 18×18 мм, толщиной 0,17 мм. В течение десяти дней через сутки из соответствующих рамок вынимались обросшие микроорганизмами стекла и записывались голограммы. Примеры восстановленных изображений одноклеточных диатомовых водорослей, прикрепившихся к поверхности покровных стекол показаны на рис. 1.

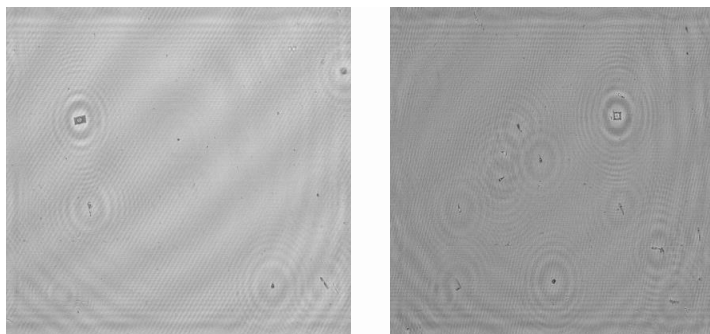


Рис. 1. Примеры восстановленных изображений прикрепленных к поверхности покровного стекла одноклеточных диатомовых водорослей (до 40 мкм)

В результате работы была установлена принципиальная пригодность метода цифровой голографической микроскопии для исследования процесса микрообрастания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-42-920003).

Ю.Д. АРАПОВ, В.Г. КАМЕНЕВ, М.Е. ДВОРНИЧЕНКО
*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛОЙНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЪЕМА ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В данной статье представлены результаты исследования процесса послойного восстановления пылевого объема с помощью голографического метода. Выполнено моделирование и расчет синтезированной и экспериментальной голограммы по схеме Габора для в модельных слоях. Проведена математическая обработка голограмм, в результате которой было выполнено послойное восстановление слоев пыли с четко наблюдаемым положением исходных частиц пыли. Отработанная методика позволяет получать данные по снимкам лазерных пучков прошедших через среды с частичками пыли или иными повреждениями с концентрацией до 10^6 1/см³ в исследуемом объеме.

Yu.D. ARAPOV, V.G. KAMENEV, M.E. DVORNICHENKO
N.L. Dukhov All-Russian Scientific Research Institute of Automatics, Moscow

RESEARCH LAYER RECOVERY OF DUST VOLUME BY HOLOGRAPHIC TECHNIQUE

The article presents the results of research layer recovery of dust volume by holographic technique. Realized modeling and calculation of synthetic hologram on Habor scheme to given number and size of dust particle. Mathematics treatments of received hologram were made, and layer recovery dust volume with clear observed starting particles were made in result. Advanced technique give us possibility to have information about size and position of dust particle with concentration until 10^6 1/cm³ in examine volume.

Оптические методы применяются в таких областях как исследование явления пылеобразования в газодинамических процессах [1, 2]. При этом активно применяются различные лазерно-интерферометрические методы. Однако при разрушении структуры образца и образовании мелкодисперсных частиц, регистрация скоростей движения объектов исследования гетеродинными методами существенно усложняется. Скорость движения частиц дисперсной фазы превышает скорость движения свободной поверхности, а плотность частиц может достигать величины, достаточной для полного экранирования свободной поверхности. Одним из методов, позволяющих с высокой точностью

регистировать параметры частиц дисперсной фазы в быстропротекающих процессах является цифровая голография. Регистрация голограмм с последующим математическим восстановлением изображений [3] позволяет регистрировать объекты порядка 1 мкм и увеличить глубину резко изображаемого пространства почти на порядок по сравнению с электронно-оптической фотографией.

В настоящей статье представлены результаты постановки и решения задачи статического моделирования процесса пыления эквивалентных ситуации при выполнении взрывных экспериментов по метанию пластины когда в фиксированный момент времени после запуска пластины распределение частиц пыли в исследуемом объеме фиксировано и неподвижно – статический режим. Исследования голографического восстановления пылевого объема выполнены в варианте регистрации голограммы по схеме Габора, как на основе синтезированной голограммы, так и для экспериментально полученной голограммы. Результаты представлены на рис. 1.

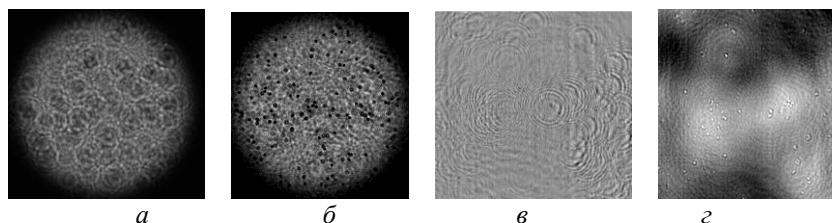


Рис. 1. Результаты регистрации голограммы и послыонного восстановления пылевого объема в статическом режиме: синтезированная голограмма (а), восстановленный пылевой объем по синтезированной голограмме (б), экспериментальная голограмма (в), восстановленный пылевой объем по экспериментальной голограмме (г)

Выполненные исследования показали возможность восстанавливать объемное расположение частиц пыли по одной голограмме до концентрации 10^6 частиц на 1 см^3 .

Список литературы

1. Buttler W.T., Williams R.J.R., Najjar F.M. // J. dynamic behavior mater. 2017. V. 3. P. 151.
2. Buttler W.T., Or'o D.M., Preston D.L., et. al. // Journal of Fluid Mechanics. 2012. V. 703. P. 60-84.
3. Sorenson D.S., Pazuchanics P., Johnson R., et. al. // Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-11-04995. 2014.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предложен способ записи и последующего восстановления голограмм пропускающих периодических структур световыми волнами, дифрагированными на исследуемой структуре. Представлены экспериментальные результаты опробования предложенного метода при исследовании динамики двумерных периодических структур в реальном времени.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

HOLOGRAPHIC INTERPEROMETRY OF REAL TIME FOR DYNAMIC PERIODIC STRUCTURES

A method for recording and subsequent restoration of holograms of transient periodic structures by light waves diffracted on the structure under study is proposed. The experimental results of testing the proposed method in the study of the dynamics of two-dimensional periodic structures in real time are presented.

В настоящее время ведутся исследования как по разработке технологий изготовления структурированных объектов, так и по изучению механизмов взаимодействия оптического излучения с такими структурами. Не менее интересно и поведение самих структур в пространстве и во времени [1-3].

В работе предлагается метод голографической интерферометрии реального времени для исследования динамики периодических структур. Суть метода заключается в формировании интерференционных картин, отображающих пространственное поведение периодической структуры объекта во времени, с применением записи и последующим восстановлением опорной голограммы периодической структуры световыми волнами, дифрагированными непосредственно на исследуемой структуре.

На рис. 1 представлена оптическая схема, поясняющая запись и восстановление голограммы при реализации данного метода голографической интерферометрии. Опорная голограмма H записывается

парой волн, дифрагированных на исследуемой структуре O . Плоскость голограммы оптически сопряжена с периодической структурой O объективами L_3 и L_4 .

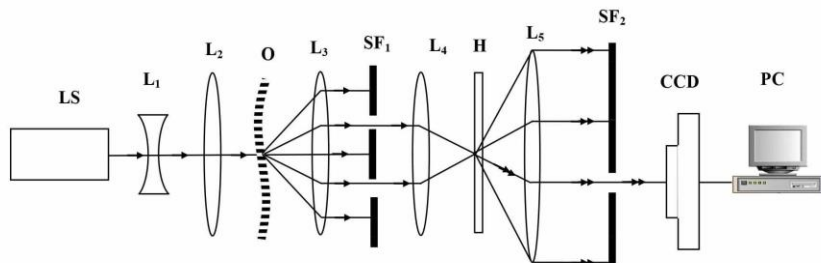


Рис. 1. Оптическая схема, поясняющая запись и восстановление опорной голограммы при реализации метода голографической интерферометрии периодических структур: LS - лазерный источник света; L1 - рассеивающая линза, L2, L3, L4, L5 - объективы; O - исследуемая периодическая структура, SF1, SF2 - экраны; H - голограмма; CCD - цифровая фотокамера; PC - персональный компьютер

Интерференционная картина, визуализирующая поведение периодической структуры в реальном времени, формируется при наложении пары световых волн: одной из прямопрошедших и волны, дифрагированной на опорной голограмме в +1 или -1 порядок. Такая пара волн выделяется отверстием в экране SF₂, установленном в задней фокальной плоскости объектива L₅, и в плоскости, оптически сопряженной с голограммой H, регистрируется цифровой камерой CCD. При опробовании метода голографической интерферометрии динамических периодических структур в качестве объекта была использована двумерная периодическая структура, представляющая собой крестообразную сетку. Была получена серия интерферограмм, отображающих поведение сетки при нарастающей деформации ее поверхности.

Список литературы

1. Авласевич Н.Т., Буть А.И., Ляликов А.М. // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. М.: МИФИ, 2017. С. 622-623.
2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Проблемы физики, математики и техники. 2017. № 3. С.7-13.
3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. 2018. Т. 8. № 3. С. 55-62.

Г.Г. ГОЛЕНКО
ОАО «Спейс Вижн», Москва

ФИЗИКА И МЕТАФИЗИКА ЗРЕНИЯ

В данной работе под «физикой» мы будем понимать теоретические положения, прошедшие экспериментальную проверку. Под «метафизикой» мы будем понимать последовательность умозаключений, не прошедшие экспериментальную проверку к настоящему времени. В работе рассмотрены основные физические и метафизические положения, относящиеся к психологии зрительного восприятия. Приведены результаты интроспективных наблюдений поведения обычных зрительных объектов, претерпевших перцептивные искажения. Рассмотрены элементы бимодальной системы когнитивной деятельности головного мозга.

G.G. GOLENKO
OJSC "Space Vision", Moscow

PHYSICS AND METAPHYSICS OF VISION

In this paper, by "physics" we will understand the theoretical positions that have passed the experimental test. By "metaphysics" we will understand the sequence of conclusions that have not passed the experimental test to date. The paper deals with the basic physical and metaphysical positions related to the psychology of visual perception. The article presents the results of introspective observations of the behavior of ordinary visual objects that have undergone perceptual distortion. The elements of the bimodal system of cognitive activity of the brain are considered.

Зрительная система человека является частью головного мозга. В силу своей специфики, а именно, способностью к внутренней визуализации перцептивных зрительных аберраций [1], зрительная система способна в визуальной форме информировать нас посредством интроспективных наблюдений процессов, происходящих в мозге при формировании в нём зрительных образов. Представляет интерес интроспективное наблюдение перцептивной спонтанной коррекции внештатной ситуации при наблюдении стандартного телевизионного изображения. На рис. 1: 1 - персоналии мизансцены; 2 - часть исходной некорректированной картинки; 3 - часть конечной корректированной картинки; 4 - постоянная часть детектора ошибок (петли, цепочки) Бехтеревой; 5 - корректирующие фрактальные эпициклы; O - центр вращения корректированных изображений и их версий.

Процесс коррекции перцептивно происходит следующим образом: часть 2 некорректированного изображения изначально занимает всю площадь корректируемого фрагмента. После чего, сверху вниз, как лопасть обтюлятора с центром вращения O , корректируемая картинка 3 начинает перекрытие исходной картинке 2, с последующим полным её замещением. При этом, происходит три полноценных движения: внутренние движения картинок 2 и 3 и движение обтюраторного типа картинке 3. Чтобы исключить разнос системы, остановку итерации осуществляет ЭГО на подсознательном уровне.

Эффективное обеспечение коррекции обеспечивается, что доказано экспериментально Н.П. Бехтеревой и её сотрудниками (1968), посредством циклических постановок версий картинок (переменная часть) в постоянную часть детектора ошибок. В свою очередь, замена и коррекция версий и их фрагментов, обеспечивается, пока гипотетически, фрактальными эпициклами, устроенных по принципу детектора ошибок. Фрактальный механизм интересен тем, что он позволяет проводить коррекцию версий и её элементов на любом уровне пространственных частот. При этом, скорость коррекции по фронту общего движения может быть постоянной, а скорость заполнения в дофронтальной зоне порядка скорости цепной реакции.

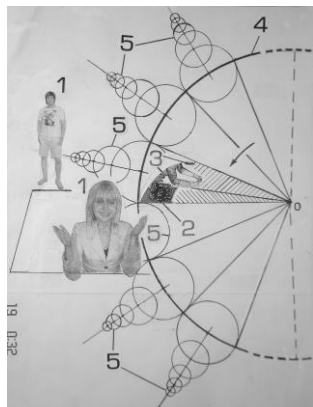


Рис. 1. Коррекция
внештатной ситуации
при наблюдении
телевизионного изображения

Рассмотрение перцептивных историй, при которых происходит экстраполяция событий, соответствует ф-феномену Вертгеймера, при котором переживание движения происходит без присутствия самого объекта движения. Есть вероятность того, что паника, возникшая при демонстрации трехминутного ролика братьев Люмьер «Прибытие поезда» возникла из-за перцептивного «тарана» паровозом зала кафе, в котором находились зрители. Тем самым, зрительная система из гуманистических соображений пыталась предотвратить пусть мнимую, но угрозу.

Список литературы

1. Голенко Г.Г. Перцептивные зрительные aberrации. Голография. Наука и практика // XIV Международная конференция HOLOEXPO 2017: Тезисы докладов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 138-141.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ,
Н.А. ТРОЦЕНКО, Т.Ш. ФАЗЛИЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СИНТЕЗ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ФИЛЬТРА МСЭК ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены результаты корреляционного распознавания субпиксельных изображений с использованием корреляционного фильтра с минимальной средней энергией корреляции. Рассмотрены алгоритмы дополнительной предобработки распознаваемых изображений с целью улучшения характеристик корреляционного распознавания.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV,
N.A. TROTSENKO, T.Sh. FAZLIEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

SYNTHESIS OF THE MACE CORRELATION FILTER FOR SUB-PIXEL IMAGES RECOGNITION

The results of the correlation recognition of sub-pixel images using the minimum average correlation energy filter are presented. Algorithms for additional preprocessing of recognizable images to improve the characteristics of correlation recognition are considered.

Инвариантный корреляционный фильтр МСЭК [1, 2], используемый в данной работе, позволяет минимизировать среднюю энергию в плоскости корреляции, корреляционный отклик становится более локализованным, обеспечивая высокую точность распознавания изображений [1]. Задача обнаружения объектов на больших расстояниях сводится к анализу субпиксельных изображений, точность распознавания которых значительно ниже по сравнению с обычными. На данный момент, актуальной задачей является задача локализации объекта, характерный линейный размер которого равен не более 12 пикселей, а также классификация объекта с характерным линейным размером 32 пикселя.

Целью работы является синтез корреляционного фильтра МСЭК из предобработанного тренировочного набора субпиксельных изображений и дальнейшее корреляционное распознавание субпиксельных изображений. Данная задача была выполнена следующим образом. Были

рассмотрены 2 случая: тренировочные субпиксельные изображения без дополнительной обработки и с обработкой. В качестве распознаваемых объектов использовались несколько наборов изображений танков T72, Abrams, Chieftain и Leopard с различными фонами и разрешениями от 32x32 до 64x64 пикселя. Для повышения точности распознавания использовались несколько различных алгоритмов растяжения субпиксельных изображений. На рис. 1 на верхнем графике представлены дискриминационные характеристики наборов изображений на черном фоне до обработки изображений, на нижнем графике – после обработки.

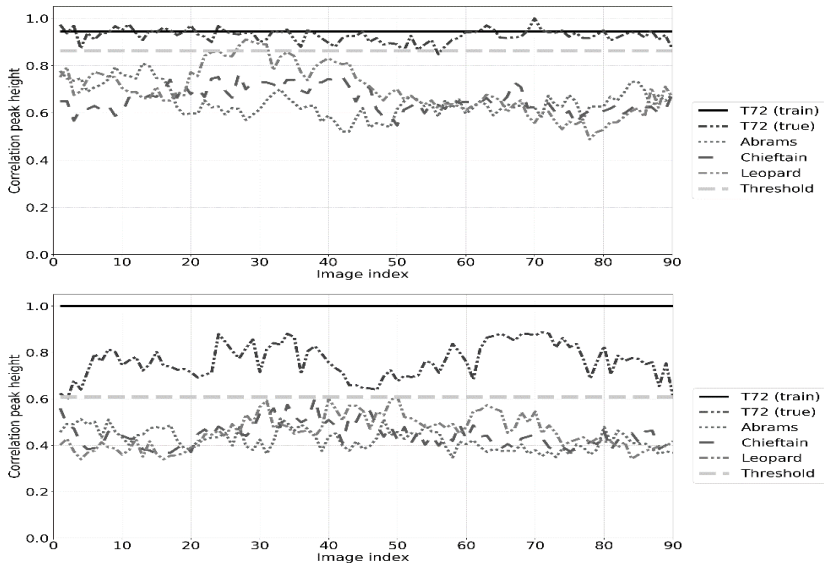


Рис. 1. Дискриминационные характеристики: до предобработки (верхний график), после предобработки (нижний график)

В результате вероятность ошибки, рассчитанная по критерию Неймана-Пирсона, уменьшилась с 6.1 % без предобработки до 3.3 % с предобработкой изображений. Для других наборов изображений также было установлено, что данная предобработка тренировочных изображений улучшает результаты.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.
2. Evtikhiev N., Shaulskiy D., Zlokazov E., Starikov R. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V. 8398.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Е.К. ПЕТРОВА, Н.М. ПОНОМАРЕВ,
Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Приведены результаты моделирования корреляционного распознавания цветных изображений с учётом особенностей цветковых моделей RGB YCbCr и Lab и выделением цветкового канала для улучшения качества распознавания объектов интереса.

D.S. GONCHAROV, E.K. PETROVA, N.M. PONOMAREV,
R.S. STARIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

FEATURES OF APPLICATION OF COLOR MODELS AT IMAGES RECOGNITION USING INVARIANT CORRELATION FILTERS

The results of moderation on the correlation recognition of color images are given taking into account the features of the RGB YCbCr and Lab color models and highlighting the color channel to improve the recognition quality of objects of interest.

Настоящая работа посвящена применению инвариантных корреляционных фильтров (КФ) [1, 2] при распознавании цветных изображений. Информация о цвете, заложенная в цветковых каналах, даёт некоторые дополнительные возможности при распознавании с использованием КФ. В зависимости от цветовой модели эта информация представлена различно. Целью работы является исследование возможностей использования различных комбинаций цветковых каналов при корреляционном распознавании объектов интереса одинаковой формы, но разной окраски. При моделировании применялись варианты КФ с минимумом энергии корреляции и с максимальной высотой корреляционного пика [2]; были использованы три цветковые модели: RGB, YCrCb и Lab [3]. В модели RGB используются сочетания красного (Red), зеленого (Green), синего (Blue) цветов различных яркостей. В модели YCrCb используется сочетания красного и синего цвета

с 256 градациями серого (канал Y). В модели Lab (CIE LAB) применяют три независимые характеристики цвета: светлота – l (luminance), насыщенность – с (chrominance), оттенок – h (hue). Манипулируя параметрами представления цвета, можно получить изображение объектов интереса одинаковой формы, но представленных в различном цветовом решении, которые будут сильно отличаться друг от друга, что даёт возможность повысить характеристики распознавания, в том числе при камуфляжной раскраске или при раскраске «хамелеон». Кроме того, поскольку представление цветových каналов – полутоновое, при реализации распознавания цветных изображений в оптико-цифровых дифракционных корреляторах [1], не требуется специальных мер для представления цвета, и такие системы могут базироваться на доступных средствах модуляции света, например на микрзеркальных модуляторах света, обеспечивающих наилучшие скоростные характеристики ввода и обработки изображений. Примеры результатов моделирования представлены на рис. 1 и 2.

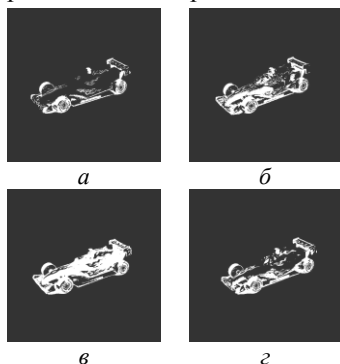


Рис. 1. Объекты интереса в канале «а» в модели Lab, (объекты одинаковой формы, но разной окраски)

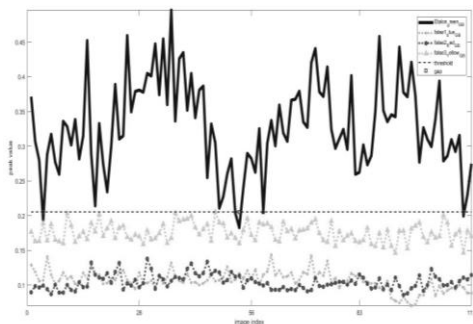


Рис. 2. Дискриминационная характеристика (зависимость высоты корреляционного пика от угла поворота объекта) для разности каналов G и B в модели RGB, распознаётся объект с определённой окраской

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-07-00829.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.
2. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study // Optical Engineering. 2008. V. 47(6).
3. Панов Е.А. Познание цвета: Равнозначность цвета в цифровых системах. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.

Д.С. ГОНЧАРОВ, Н.М. ПОНОМАРЕВ, Р.С. СТАРИКОВ,
Н.А. ТРОЦЕНКО, Т.Ш. ФАЗЛИЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ,
ИНВАРИАНТНЫХ К ОСВЕЩЕННОСТИ СЦЕНЫ**

Предложены методы получения высокой степени инвариантности корреляционных фильтров к освещенности сцены путем предобработки изображений из тренировочного набора при синтезе корреляционных фильтров.

D.S. GONCHAROV, N.M. PONOMAREV, R.S. STARIKOV,
N.A. TROTSENKO, T.Sh. FAZLIEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**INVESTIGATION OF METHODS
OF CORRELATION FILTERS SYNTHESIS
WITH SCENE ILLUMINATION INVARIANCE**

Methods for obtaining high degree of scene illumination invariance by preprocessing images from the training set during the synthesis of correlation filters are proposed.

В задачах корреляционного распознавания образов необходимо располагать инвариантностью к большому числу факторов: поворотам объектов, изменению масштаба, незначительным изменениям формы и уровню освещенности (в том числе, шуму). Изменение уровня освещенности может быть обусловлено изменением освещения объекта в зависимости от времени или места съемки, изменением количества отраженного света в зависимости от материала поверхности объекта, чувствительностью камеры, временем экспозиции и т.д. В широком круге задач трудно спрогнозировать, насколько значительно будет отличаться освещение в реальных условиях от освещения, использовавшегося при обучении, а потому трудно предсказать, соответствие качества распознавания на обучающей выборке и в работе.

Целью данной работы было исследование инвариантности корреляционных фильтров (КФ) к изменению уровня освещенности входной сцены. Изменение уровня освещенности, в первую очередь,

влияет на среднюю интенсивность изображения, а также на дисперсию интенсивности. В ходе работы была произведена оценка влияния освещенности на качество распознавания изображений при синтезе КФ из изображений с заданным освещением. Были получены изображения одного и того же объекта в идентичных условиях при различной освещенности, после чего были синтезированы КФ двух типов (МАСН и MINACE [1]) из наборов изображений с различной освещенностью. Для каждого КФ были проведены распознавания всех наборов и рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) корреляционных откликов для тренировочного и тестовых наборов.

Для получения инвариантности к уровню освещенности были использованы различные методы предобработки, направленные на приведение исходных изображений к некоторому «нормальному виду», в частности, были использована эквализация гистограмм изображений (гистограммы изображений приводятся к виду, близкому к равномерному распределению) и нормализация изображений (увеличение полного динамического диапазона интенсивности пикселей изображения до 8 бит). Примеры изображений, полученных после эквализации гистограммы и нормализации приведены на рис. 1.

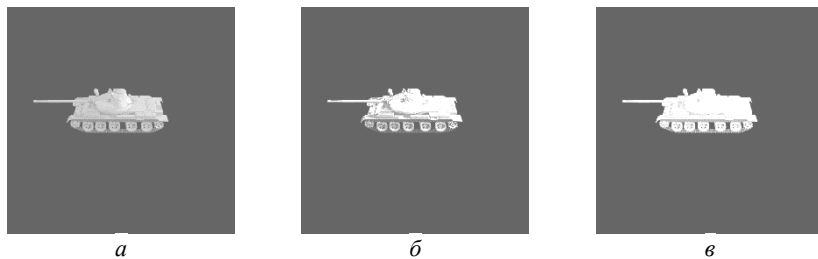


Рис. 1. Примеры изображений: исходное изображение (а), изображение с эквализацией гистограммы (б), нормированное изображение (в)

Было проведено моделирование корреляционного распознавания для необработанных и предобработанных изображений. При использовании предобработанных изображений в качестве тренировочных для сильно отличающихся освещенностей СКО корреляционных откликов значительно снизились, что позволяет говорить о полученной высокой степени инвариантности к уровню освещенности сцены.

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R.D. Correlation Pattern Recognition. Cambridge University Press, 2005.

Е.А. КУРБАТОВА, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ ПРИ СЖАТИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Для задачи оперативной бинаризации цифровых голограмм реализованы 30 локальных и глобальных методов. Определены оптимальные параметры локальных адаптивных методов бинаризации, обеспечивающие наилучшее соотношение качества восстановления и времени обработки.

E.A. KURBATOVA, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

THE ANALYSIS OF BLOCK STRUCTURE OF LOCAL BINARIZATION METHODS UNDER DIGITAL HOLOGRAM COMPRESSION

For operative binarization of digital holograms 30 local and global methods are implemented. Optimal parameters of local adaptive binarization methods that provide the best balance between reconstruction quality and processing time are determined.

Распространенным способом сжатия информации является ее бинаризация (например, снижение разрядности файлов изображений до 1 бита или двух градаций). Существуют две основные группы методов бинаризации изображений: на основе глобального и локального порога [1, 2]. В случае глобальных методов бинаризации пороговое значение постоянно для всего изображения, а в случае локальных методов изображение разбивается на блоки $N \times N$ пикселей и пороговые значения определяются для каждого блока в отдельности.

Для сжатия цифровых голограмм реализовано 30 методов бинаризации, в том числе 12 методов локальной бинаризации [3]: методы Бернсена [5], Отсу [1], Брэдли [6] и др. На рис. 1 представлены фрагменты (64×64 пикселей) экспериментально записанной [4] цифровой голограммы, сжатой локальными методами бинаризации Бернсена (a, b) и Отсу (v, z), а также восстановленные со сжатых голограмм изображения ($d-z$). Экспериментально записанные цифровые голограммы, сжатые методом Отсу, обеспечивают более высокое качество восстановления изображений, чем в случае метода Бернсена.

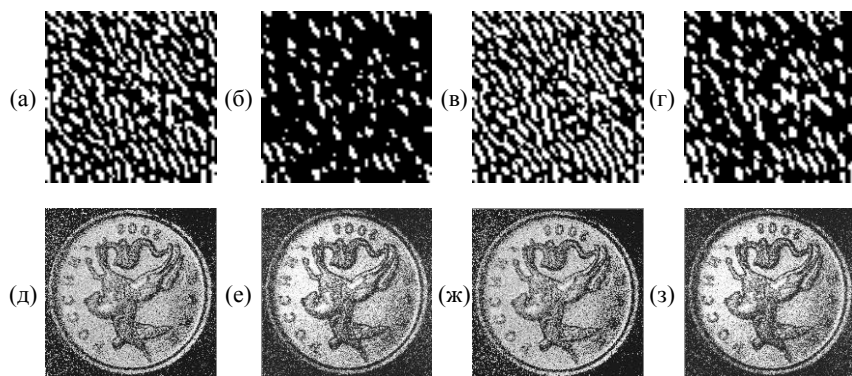


Рис. 1. Фрагменты цифровой голограммы, бинаризованной методами Бернсена (а, б) и Отсу (в, г) и соответствующие восстановленные изображения (д, е), (ж, з), размер блока методов бинаризации составил 2×2 (а, в) и 7×7 (б, г) пикселей

При увеличении размера блока до 7×7 пикселей (рис. 1е, з) наблюдается повышение качества изображения по сравнению со случаем использования блока размером 2×2 пикселя на 3-5 % по величине отношения сигнал/шум. При дальнейшем увеличении размера блока качество практически не повышается, однако значительно возрастает вычислительная ресурсоемкость методов. Следовательно, размер блока 7×7 пикселей может быть определен как оптимальный.

Таким образом, можно выбрать подходящий размер блоковой структуры локальных методов исходя из соотношения необходимого качества восстановления и вычислительной ресурсоемкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00389.

Список литературы

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. 4th ed. New York: Pearson, 2018.
2. Sezgin M., Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // J. Electron. Imaging. 2004. V. 13. P. 146-165.
3. Chermkhin 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.
4. Chermkhin P.A., Kurbatova E.A. Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarization of off-axis digital holograms // Opt. Laser. Eng. 2019. V. 115. P. 119-130.
5. Bernsen J. Dynamic thresholding of grey-level images // Proceedings of 8th International Conference on Pattern Recognition, Paris, France. 1986. P. 1251-1255.
6. Bradley D., Roth G. Adaptive Thresholding Using the Integral Image // J. Graph. Tools. 2007. V. 12. P. 13-21.

Д.А. РЫМОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕИТЕРАТИВНЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ПОРЯДКОВ ДИФРАКЦИИ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Для фильтрации нежелательных порядков дифракции при восстановлении изображений с осевых цифровых голограмм применены различные неитеративные методы. Приведены результаты восстановления изображений с использованием данных методов и их сравнение с разработанным нелинейным методом.

D.A. RYMOV, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NONLINEAR NON-ITERATIVE FILTER OF UNDESIREDDIFFRACTION ORDERS IN DIGITAL HOLOGRAPHY

A number of non-iterative methods for undesired diffraction orders filtering in inline digital holography were applied. Results of image reconstruction from filtered holograms are given and compared with the proposed nonlinear method's performance.

Цифровая голография позволяет регистрировать информацию о статических и динамических сценах и численно их воспроизводить. Серьезной проблемой при восстановлении изображений является наличие нежелательных порядков дифракции и их пересечение с информативным порядком [1]. Для подавления нежелательных порядков используют как оптические [2] так и цифровые методы фильтрации [1, 3-7], которые позволяют производить фильтрацию при численном восстановлении изображения. Существуют различные группы цифровых методов: линейные [3] и нелинейные [4], итеративные [5] и неитеративные [3, 4], действующие как в предметной [3], так и в частотной областях [6, 7]. Для возможности оперативной фильтрации в работе рассмотрены различные неитеративные методы и предложен вариант нелинейной фильтрации.

На рис. 1 представлены восстановление изображения с исходной цифровой осевой голограммы (а) и результаты фильтрации: вычитанием из нее среднего (б) и вычитанием значений, полученных медианным фильтром (в), частотными фильтрами: линейным (г) и нелинейным (д). На рис. 1е приведен результат применения разработанного метода, использующего гауссово-оковую фильтрацию в частотной плоскости и нелинейную - в координатной.

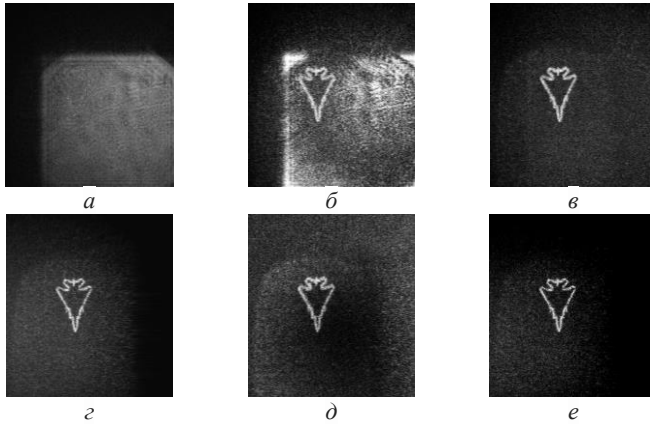


Рис. 1. Восстановление изображения с исходной голограммы (а) и после фильтрации: вычитанием среднего (б); вычитанием значений, полученных медианной фильтрацией (в); линейным частотным фильтром (г); нелинейным гауссовым частотным фильтром (д); разработанным нелинейным методом (е)

Как видно из рис. 1, качество восстановления объекта при использовании разработанного метода выше (как с визуальной точки зрения, так и количественно), чем при использовании других неитеративных методов. Это достигается за счет более высокого уровня контроля над параметрами фильтрации благодаря возможности более глубокойustomизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 18-79-00277.

Список литературы

1. Stoykova E., Kang H., Park J. Twin-image problem in DH - a survey // Chin. Opt. Lett. 2014. V. 12(6). P. 060013.
2. Siemion M., Sypek M., Makowski J., et. al. One-exposure phase-shifting digital holography based on the self-imaging effect // Opt. Eng. 2010. V. 49. P. 055802.
3. Jensen B.H.F., Kakuta T., Shikama T. Measurement of nuclear reactor local heat rates by optical fiber infrared emission // Opt. Eng. 1997. V. 36(8). P. 2353-2355.
4. Pavillon N., Seelamantula Ch.S., Kühn J, et al. Suppression of the zero-order term in off-axis digital holography through nonlinear filtering // Appl. Opt. 2009. V. 48(34). P. H186-H195.
5. Zhang W., Cao L., Brady D.J., et. al. Twin-Image-Free Holography: A Compressive Sensing Approach // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. P. 093902.
6. CuChe E., Marquet P., Depeursinge Ch. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography // Appl. Opt. 2000. V. 39(23). P. 4070-4075.
7. Liu N., Yang Ch. The elimination of zero-order diffraction of 10.6 Im infrared digital Holography // Infrared Phys. Technol. 2017. V. 82. P. 133-139.

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ОДНОПИКСЕЛЬНЫХ РЕГИСТРАЦИЙ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Проведено моделирование однопиксельной регистрации излучения от объектов при совместном использовании методов компрессионного считывания и цифровой голографии. Получены результаты по восстановлению изображений объектов для различного количества измерений.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OBJECTS RECONSTRUCTION FROM SINGLE-PIXEL REGISTRATIONS IN DIGITAL HOLOGRAPHY

A single-pixel registration of illumination from the object was modeled using a combination of compressed sensing and digital holography techniques. Reconstructed object images for different numbers of measurements are given.

Методы компрессионного считывания (compressed sensing, CS) направлены на восстановление информации из частично-потерянного сигнала или из набора сигналов, которых может быть недостаточно согласно теореме Котельникова [1]. В последние десять лет КС нашло различные варианты применения: томография, создание камер и др. [2].

Серьезным прорывом в технологии CS стало использование однопиксельных детекторов [3]. На отсчеты цифрового микрозеркального устройства (digital micromirror device, DMD) выводился псевдослучайный набор значений. Излучение, идущее от объекта, отражалось от поверхности DMD и регистрировалось фотодиодом несколько сотен или тысяч раз, что существенно меньше количества пикселей цифровых камер. Восстановление осуществляется методами оптимизации [2].

Совмещение CS с цифровой голографией позволило восстанавливать не только амплитуду объекта, но и фазу [4, 5]. Примером подобной системы является свертка интерференционной картины с сигналами, отображенными на DMD (рис. 1). На рис. 2 приведены распределения интенсивности: по исходному объекту (рис. 2а) и по восстановленным в результате проведенного моделирования.

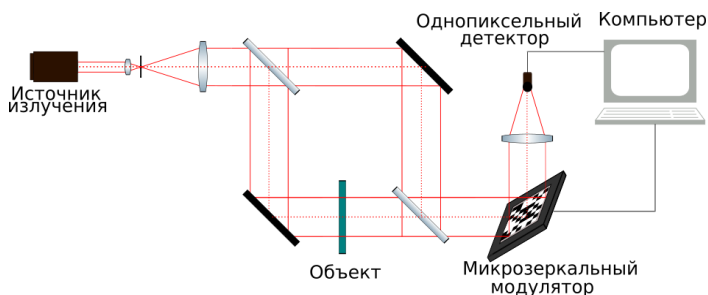


Рис. 1. Схема однопиксельной регистрации сигнала в цифровой голографии

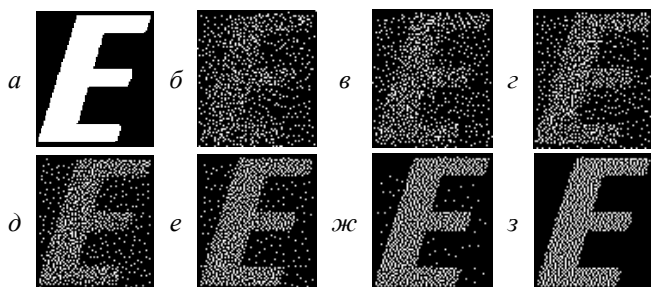


Рис. 2. Бинарный объект: исходный (а) и восстановленный из 3500 (б), 4500 (в), 5500 (г), 6500 (д), 7500 (е), 8500 (ж) и 9500 (з) регистраций

Таким образом, при использовании числа регистраций, равного 31 % (рис. 2б) от количества пикселей исходного изображения, объект уже различим с визуальной точки зрения. Подобные системы позволяют получить амплитудно-фазовые профили в видимом и ИК-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. Zhang Z., Xu Y., Yang J., Li X., Zhang D. A Survey of Sparse Representation: Algorithms and Applications // IEEE Access. 2015. V. 3. P. 490-530.
3. Duarte M.F. Single-pixel imaging via compressed sampling: Building simpler, smaller, and less-expensive digital cameras // IEEE Signal Process. Mag. 2008. V. 25. P. 83-91.
4. Leportier T., Park M.-C. Holographic reconstruction by compressive sensing // J. Opt. 2017. V. 19(6). P. 065704.
5. Martínez-León L., Clemente P., Mori Y., Climent V., Lancis J., Tajahuerce E. Single-pixel digital holography with phase encoded illumination // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 4975.

В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА, И.Ю. ЭРКИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОДАВЛЕНИЕ СПЕКЛ-ШУМА ЗА СЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ НАБОРА КИНОФОРМОВ, СОДЕРЖАЩИХ РАЗРЕЖЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предлагается методика подавления спекл-шума за счет динамического отображения набора киноформов, каждый из которых содержит отдельное разреженное изображение. При достаточно быстром отображении такого набора на модуляторе света, отдельные изображения усредняются в единое полное изображение, при этом, поскольку отдельные изображения разрежены, спекл-шум в них существенно снижен по сравнению с полным изображением. Экспериментально продемонстрировано 3-х кратное снижение спекл-шума предложенным методом.

V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA, I.Yu. ERKIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

SPECKLE SUPPRESSION BY DISPLAY OF MULTIPLE KINOFORMS CONTAINING SPARSED IMAGES

The technique of speckle-suppression by dynamic display of a set of kinofoms, each of which contains unique sparsed image, is presented. When this set is displayed on spatial light modulator with sufficiently high framerate, separate images merge into one whole image. Also, because separate images are sparsed, speckle-noise in them is greatly reduced compared to single whole image. 3 times speckle-noise reduction is experimentally demonstrated.

Основным фактором, ограничивающим точность оптической реконструкции изображений с дифракционных оптических элементов (ДОЭ), является спекл-шум. Наиболее распространенный метод подавления спекл-шума заключается в мультиплицировании ДОЭ, то есть его многократном повторении вдоль каждой из осей. При этом размер элемента формируемого изображения пропорционально уменьшается, степень перекрытия соседних элементов уменьшается, и спекл-шум снижается. Данный метод эффективно подавляет спекл-шум, однако приводит к тому, что формируемое изображение становится разреженным и визуально тусклым.

Существует метод подавления спекл-шума путем синтеза набора ДОЭ, содержащих одно и то же изображение, но используя различные стартовые случайные фазовые распределения. Это приводит к тому, что такие ДОЭ при оптической реконструкции содержат различные картины спекл-шумов. При динамическом отображении такого набора ДОЭ на пространственно-временном модуляторе света (ПВМС) с достаточно высокой частотой кадров, реконструируемые изображения усредняются в одно и спекл-шум подавляется примерно в корень из числа ДОЭ раз. В данной работе предложена модернизация этого метода, которая состоит в том что вместо того чтобы синтезировать ДОЭ, содержащие полное изображение, синтезируются ДОЭ, содержащие разреженные изображения. Причем каждое разреженное изображение содержит часть пикселей полного, при усреднении всех изображений получается исходное полное изображение. За счет того что каждое отдельное изображение разрежено, формирующийся спекл-шум оказывается гораздо слабее, как и в случае мультиплицированного ДОЭ, но поскольку набор ДОЭ содержит все пиксели исходного изображения, формирующееся в результате изображение оказывается полным.

Были проведены оптические эксперименты по подавлению спекл-шума базовым и модернизированным методами. Результаты приведены на рис. 1. Значения нормированного среднеквадратического отклонения составили 0,47 для одиночного ДОЭ, 0,20 для базового и 0,16 для модернизированного методов.



Рис. 1. Оптически восстановленное изображение с: одиночного ДОЭ (*а*), набора из 9 ДОЭ, содержащих полное изображение (*б*), набора из 9 ДОЭ, содержащих разреженные изображения (*в*)

Таким образом, предложенный метод подавления спекл-шума по результатам оптических экспериментов продемонстрировал существенное повышение качества оптической реконструкции изображений с ДОЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 18-79-00277.

А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ОПТИМИЗАЦИИ
СЕНСОРОВ ЦИФРОВЫХ КАМЕР
ПУТЁМ ВАРЬИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПИКСЕЛЯ**

Для получения оптимальных соотношений качества снимков и стоимости сенсора камеры проведены эксперименты по варьированию параметров пикселей для широкого диапазона сигналов. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации фототехники под конкретную задачу.

A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

**ANALYSIS OF POTENTIAL
OF DIGITAL CAMERA SENSOR OPTIMIZATION
BY THE PIXELS CHARACTERISTICS VARYING**

For estimation of best ratios of image quality and camera sensor cost, experiments were performed. Signals range, camera gain and other parameters were varied. The obtained results can be used for camera optimization under a specific task.

К числу наиболее важных задач фототехники относят оценку отношения сигнал/шум регистрируемых снимков, а также возможности его увеличения, что необходимо как для научных, так и для любительских задач. Существуют различные методы шумоподавления: покадровое усреднение [1], коррекция плоским полем [2], компенсация портрета пространственных шумов [3] и др. Важными характеристиками пикселей камер являются: константа пересчёта K генерируемых электронов в цифровые единицы сигнала, число электронов при насыщении и др. Например, K в определённом диапазоне сигналов (обычно при малых и средних яркостях относительно насыщения) играет основную роль в выражении для подсчёта уровня шума. С другой стороны K связывает яркость излучения и разрядность снимка. В работе исследуется задача нахождения оптимальных параметров пикселей в широких диапазонах.

Для определения оптимальных значений параметров использовалась модель шумов современных камер с ПЗС и КМОП-сенсорами [4]. Используя данную модель, получены различные зависимости отношений

сигнал/шум и соответствующих им соотношений стоимости устройства и качества получаемых изображений.

Пример полученной зависимости приведён на рис. 1. Определялись максимальные K (в числе электронов, образующих цифровую единицу) от уровня сигнала (оценённого в электронах) для случая, когда сигнал/шум не опускается ниже заданного порога. Диапазон регистрируемого сигнала пикселем варьировался от 4000 до 100000 электронов, что соответствует параметрам современных камер. В результате константа K варьировалась от 1 до 35 эл./цифр.ед. при допустимом пороге сигнал/шум, равном 51.

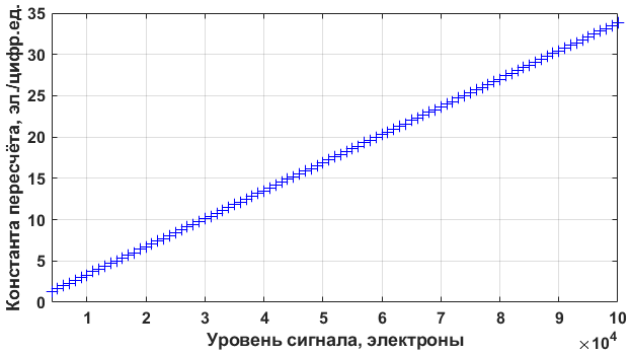


Рис. 1. График зависимости максимальных значений константы пересчёта от сигнала для случая, когда сигнал/шум не опускается ниже заданного порога

Как видно, зависимость линейна для всего диапазона уровней сигнала. Используя данную зависимость, можно подобрать необходимую чувствительность преобразования количества электронов в цифровые единицы, максимальное число электронов в пикселе и разрядность АЦП сенсора так, чтобы получить оптимальное соотношение стоимости камеры и требуемого отношения сигнал/шум.

Таким образом, набор полученных зависимостей позволяет находить балансные значения константы K для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум при минимально возможных вложениях.

Список литературы

1. Janesick J.R. Photon Transfer. SPIE Press, 2007.
2. Holst G.C., Lomheim T.S. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. SPIE Press, 2011.
3. Evtikhiev N.N., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., et. al. // Proceedings of SPIE. 2014. V. 9025. P. 90250X.
4. European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288. Release 3.1, 2016.

В.В. КРАСНОВ, И.П. РЯБЦЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

БЕЗЛИНЗОВАЯ СХЕМА ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО- НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Предлагается безлинзовая схема оптического кодирования изображений, работающая с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением. Представлены результаты экспериментальной реализации на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света.

V.V. KRASNOV, I.P. RYABCEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

THE LENSLESS SCHEME OF OPTICAL ENCRYPTION OF IMAGES UNDER SPATIALLY-INCOHERENT ILLUMINATION

The lensless scheme of optical encryption of images operating with spatially-incoherent monochromatic illumination is presented. Results of experimental implementation on the basis of two liquid crystal spatial light modulators are presented.

В настоящее время широко распространены схемы оптического кодирования, построенные на основе классической 4f-схемы. Недостатками такой схемы являются большие габариты, сложность оптической реализации, а также формирование сфокусированного нулевого порядка дифракции в плоскости фотосенсора.

В работе предлагается безлинзовая схема оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением. Отказ от линз позволяет сделать схему существенно легче, компактнее, виброустойчивее. Кроме того, отсутствие фокусирующих элементов позволяет исключить влияние дифракционной эффективности дифракционного оптического элемента (ДОЭ) на криптостойкость закодированного изображения, так как непродифрагировавший свет рассеивается и не формирует на фотосенсоре исходное изображение. Особенностью данной схемы является использование в качестве кодирующего элемента ДОЭ, синтезированного таким образом, чтобы формировать в плоскости фотосенсора требуемую функцию рассеяния точки (ФРТ), являющуюся ключом кодирования, при освещении ДОЭ расходящейся сферической волной. Такой ДОЭ выполняет функцию

фокусировки светового пучка, в результате чего потери излучения сведены к минимуму.

Безлинзовая схема оптического кодирования изображений, работающая с пространственно-некогерентным освещением, построенная на базе двух пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) приведена на рис. 1.

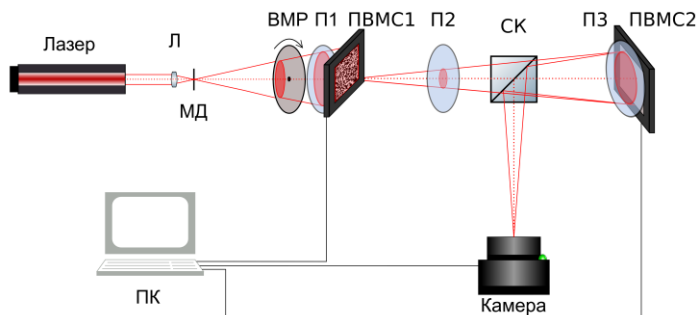


Рис. 1. Безлинзовая схема оптического кодирования изображений, работающая с пространственно-некогерентным освещением

В качестве источника излучения использовался лазер VLM-561-5 с длиной волны 561 нм и максимальной мощностью излучения 6 Вт. Комбинация линзы (Л) и микродиафрагмы (МД) формирует фильтрованный расходящийся световой пучок. Вращающийся матовый рассеиватель (ВМР) разрушает пространственную когерентность. В качестве ПВМС1 для ввода кодируемых изображений использован амплитудный ЖК ПВМС «HoloEye LC2002», имеющий 800×600 пикселей размером 32×32 мкм². В качестве ПВМС2 для отображения кодирующего ДОЭ использован фазовый ЖК ПВМС «HoloEye PLUTO VIS», имеющий 1920×1080 пикселей размером 8×8 мкм². Светоделительный куб (СК) установлен таким образом, что на фотосенсоре камеры формируется свертка изображения ПВМС1 с ФРТ кодирующего ДОЭ.

Декодирование осуществлялось численно с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову. Результаты проведенных предварительных экспериментов демонстрируют успешное кодирование и декодирование набора тестовых изображений на реализованной установке.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-07-00254.

В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АСИММЕТРИЧНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Предложен метод асимметричного оптического кодирования изображений, основанный на двукратном кодировании с использованием пространственно-некогерентного освещения, представлены результаты численного моделирования и оптического эксперимента.

V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

ASYMMETRIC OPTICAL ENCRYPTION OF IMAGES WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION

We are proposing method of asymmetrical optical encryption of images, which is based on double optical encryption with spatially-incoherent illumination. Results of numerical simulation and optical experiment are demonstrated.

Оптическое кодирование обладает рядом преимуществ по сравнению с цифровым, например более высокими быстродействием и криптостойкостью. На практике востребованы методы асимметричного (т.е. не предполагающего предварительный обмен ключами кодирования между отправителем и получателем) кодирования. Такие методы разработаны для полностью когерентного освещения, но для пространственно-некогерентного освещения они не применимы.

Предлагаемый метод основан на коммутативности операции свёртки, описывающей процесс оптического кодирования:

$$f(i, j) \otimes h(i, j) = h(i, j) \otimes f(i, j) \quad (1)$$

и может быть представлен следующим образом.

Отправитель кодирует исходное изображение I своим ключом кодирования k_1 и отправляет закодированное изображение E_1 получателю. Затем получатель кодирует полученное закодированное изображение E_1 своим ключом кодирования k_2 и возвращает двукратно закодированное изображение E_{12} отправителю.

Отправитель декодирует двукратно кодированное изображение E_{12} с помощью ключа кодирования k_1 и отправляет кодированное изображение E_2 получателю. Получатель декодирует кодированное изображение E_2 с помощью ключа кодирования k_2 и получает исходное изображение I .

Обе операции кодирования могут быть реализованы как аппаратно (оптическими методами), так и численно. Следовательно, возможны четыре модификации данной схемы кодирования. В результате предварительных исследований для дальнейшей работы были отобраны модификации, обеспечивающие баланс между быстродействием и качеством декодированного изображения:

- 1) обе операции кодирования реализованы оптически;
- 2) первая операция реализована оптически, вторая – численно.

На рис. 1 для второй модификации представлены примеры исходного, кодированных и декодированных изображений, полученных в результате оптического эксперимента, а также ключи кодирования.

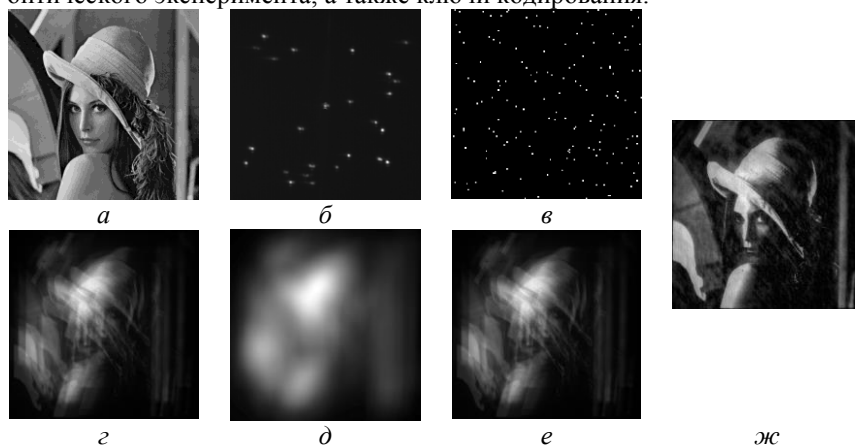


Рис. 1. Исходное изображение (*а*), ключи кодирования (*б*, *в*), однократно и двукратно (*д*) кодированные (*г*), однократно (*е*) и двукратно (*ж*) декодированные изображения для второй модификации метода

Проведённые эксперименты показали, что наиболее перспективна для дальнейших исследований вторая модификация метода. В этом случае значение минимального нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) декодированного изображения от кодируемого отличается не более чем на 8 % от НСКО, полученного в результате стандартного оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением.

Д.Ю. МОЛОДЦОВ, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
В.Г. РОДИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ МОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Показана возможность применения микрозеркальных модуляторов при решении задач оптического кодирования в реальном масштабе времени. Представлены результаты оптического кодирования изображений при использовании пространственно-некогерентного излучения.

D. Yu. MOLODTSOV, V. V. KRASNOV, P. A. CHEREMKHIN,
V. G. RODIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

APPLICATION OF MICRO-MIRROR MODULATORS FOR OPTICAL ENCRYPTION OF IMAGES IN SPATIALLY INCOHERENT RADIATION

The possibility of utilizing of micro-mirror modulator for the tasks of optical encryption in real time is described. The experimental results of optical encryption of images in spatially incoherent radiation are demonstrated.

В последнее время микрозеркальные модуляторы уже успешно зарекомендовали себя при решении задач оптического распознавания объектов [1, 2]. Быстродействие таких модуляторов на два-три порядка превышает быстродействие жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света, поэтому оправдано их применение в качестве устройств оперативного вывода голографических и дифракционных оптических элементов. Эти устройства осуществляют амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не претерпевает паразитную фазовую модуляцию, благодаря чему представляется оправданным их применение в оптических устройствах, осуществляющих операции при использовании пространственно-некогерентного входного излучения.

В данной работе рассмотрено применение микрозеркальных модуляторов в задачах оптического кодирования изображений.

Экспериментальная установка представляла собой стандартную «4f-схему». Кодлируемый объект (пример приведён на рис. 1) располагался на транспаранте в передней фокальной плоскости фурье-объектива, в задней фокальной плоскости которого был установлен микрозеркальный модулятор, на который выводились синтезированные голограммы объектов (пример объекта приведён на рис. 2), являвшихся ключами кодирования. Закодированные изображения (рис. 3) регистрировалось телекамерой, расположенной в задней фокальной плоскости второго фурье-объектива. Процесс декодирования осуществлялся методом инверсной фильтрации при использовании регуляризации по Тихонову. Декодированное изображение объекта с рис. 1 приведено на рис. 4. Таким образом, впервые была экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования микрозеркальных модуляторов в задачах оптического кодирования.

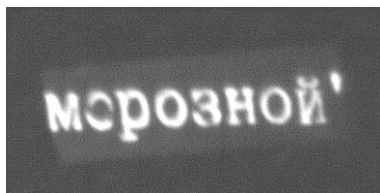


Рис. 1. Кодлируемый объект

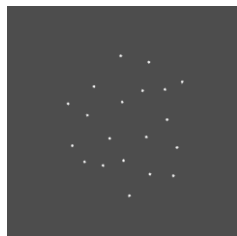


Рис. 2. Объект – кодирующий ключ

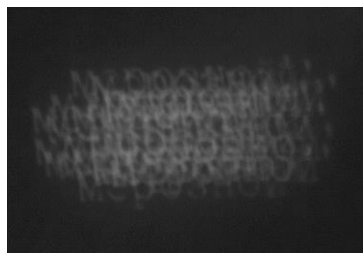


Рис. 3. Закодированное изображение



Рис. 4. Декодированное изображение

Работа была выполнена при частичной поддержке гранта «УМНИК» (заявка № 34647, договор № 12705ГУ/2017 от 24.04.2018).

Список литературы

1. Chao T.-H., Lu T.T., Walker B., Reyes G. High-speed optical processing using digital micromirror device // Proceedings of SPIE. 2013. V. 9094. P. 909402.
2. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G. Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator illumination // Proceedings of SPIE. 2016. V. 10176. P. 101761A.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Аблизен Р.С. 569
Абросимов И.Н. 639
Авдеева А.Ю. 119
Авдижиян А.Ю. 389, 421, 431
Авербух Б.Б. 507
Авербух И.Б. 507
Аверин С.В. 43, 599
Аверочкин Е.П. 673
Авершин А.А. 259
Авласевич Н.Т. 667, 717
Агафонова Д.А. 397, 489, 493
Агафонова С.Е. 195
Агринский М.В.
Адамов А.А. 631
Айвазян О.Л. 121
Аймуханов А.К. 455
Акимова Я.Е. 267, 339
Акмалов А.Э. 117, 477
Алагашев Г.К. 193
Александров А.Е. 445
Алексеев К.Н. 345
Алексеев Ю.Л. 399
Алешина Л.А. 91
Алиев С.А. 123, 329
Алиева Т. 159
Алимбеков И.Р. 467
Альтшулер Г.Б. 565
Амасев Д.В. 129
Амброзевич С.А. 73
Ананьев В.А. 193
Ануло М. 159
Андреев Н.Ф. 539
Андреева В.А. 575
Андреева К.А. 321
Андрущак Е.А. 639
Аникеева В.Е. 107
Антипов А.В. 465
Антонов А.И. 663
Антонов Е.А. 427
Антонцов М.А. 381
Антоньчева Е.А. 291, 327
Ануфрик С.С. 667, 711
Аракелян С.М. 131
Аранчий С.М. 559
Арапов Ю.Д. 715

Аржаткина Л.А. 297
Арсенин А.В. 125, 423
Артемов Д.Е. 93
Артемов Е.В. 53
Архипов Д.Н. 517
Аршинова И.Д. 211
Асташкевич С.А. 523, 527
Афанасьев А.Е. 435
Афанасьев Д.А. 609
Ахатова Ж.Ж. 603
Ахматханов А.Р. 289
Ахметов А.Р. 597
Ашуров М.С. 501

-Б-

Бабанин Е.А. 249, 255
Бабкина А.Н. 397, 489, 493
Бабурин А.С. 149
Бадиков В.В. 103, 313
Бадиков Д.В. 103, 313
Баззал Х. 549
Базыкин С.Н. 647
Базыкина Н.А. 647
Баймуратов А.С. 443
Бакланова К.Д. 97
Балакшиев В.И. 45
Балдычева А. 113
Балькин В.И. 435
Баранов А.В. 443
Баранов М.С. 631
Баршак Е.В. 345
Бастамова М.А. 205
Батшев В.И. 245
Бачинин С.В. 127
Безруков А.Д. 521
Беккиев К.М. 255
Белашов А.В. 251, 677, 699, 713
Белов П.А. 399
Белоненко М.Б. 659
Беляев В.В. 99
Беляева Т.Н. 699
Берженти И. 37
Бикбаев Р.Г. 471
Бикмухаметов Р.И. 321
Биленко И.А. 201, 591
Бильяк В.Р. 475
Бланк А.В. 249, 255

Близнюк В.В. 231
Блинов И.Ю. 541
Бобкова М.В. 161
Бобрева Л.А. 287
Бобров А.А. 211
Богачев Р.Ю. 687
Богачков И.В. 139, 341, 347, 357
Бойко Н.В. 297
Бойкова А.С. 105, 109
Бойченко А.П. 407, 669
Болдырев К.Н. 95, 107, 299
Болотова А.А. 243, 265
Боритко С.В. 41, 49
Борисов В.Н. 271
Боровых С.В. 513, 517
Бородин А.Н. 257
Бородин Ю.П. 265, 683
Бочков А.В. 197
Брецько М.В. 267, 339
Брискина Ч.М. 535
Бугай А.Н. 503
Буганов О.В. 71
Будкин И.В. 313
Булойчик Ж.И. 561
Булычев Р.П. 643
Бурдин А.В. 351
Бурдин В.А. 351
Бурдукова О.А. 203
Бурковский Г.В. 199
Бурмак Л.И. 227
Буряков А.М. 115, 475, 479
Бусурин В.И. 233, 237, 643
Бутов О.В. 35
Буть А.И. 711
Буфетов И.А. 191
Бухарина А.Б. 569
Бухаров Д.Н. 131
Бушуев В.А. 179
Бушуев С.В. 55
Быковский А.Ю. 239
Былина М.С. 361

-В-

Вартапетов С.К. 593
Васильев С.В. 587
Васина М.В. 421, 479
Васютинский О.С. 699
Вахтомин Ю.Б. 465
Вдовиченко А.Н. 579
Векшин М.М. 331, 371

Величко Е.Н. 457, 469
Вениаминов А.В. 271
Верина Е.В. 583
Веселкова Н.Г. 177
Ветров С.Я. 119
Викулин Д.В. 345
Вильшанская Е.В. 211
Вин И.Н. 233
Виноградова П.В. 515
Вишняков Г.Н. 225
Вишняков Е.А. 215
Власова К.В. 539
Вовченко Е.Д. 553
Войцеховский А.В. 405
Волков В.Г. 385, 387, 391
Волова Л.Т. 567, 581
Володин Д.О. 445
Волостников В.Г. 247
Волошин А.С. 195
Волошин В.В. 35
Вольф И.Э. 269
Ворзобова Н.Д. 705
Воробьев И.Л. 35
Воронова Н.М. 165
Воронцова И.О. 383
Воропай Е.С. 549
Восканов М.Л. 541
Вяткин М.Ю. 35

-Г-

Гаверушко В.В. 335
Гайнутдинов Р.Х. 317, 321
Галиахметова Д.И. 585
Галиев Г.Б. 475
Галимуллин Д.З. 585
Галушкин М.Г. 545
Ганжерли Н.М. 153
Ганин Д.В. 593, 595
Гаранин А.И. 135
Гарифуллин А.И. 317, 321
Герасимов В.С. 471
Герке М.Н. 131
Гетманов Я.В. 555
Гиндин П.Д. 385, 387, 391
Глаголев С.Ф. 361
Голенко Г.Г. 719
Голицин А.В. 389
Головань Л.А. 67, 463
Голодухина С.В. 417
Голубев Ю.М. 189

Голубева Т.Ю. 189
Гончаров Д.С. 261, 281, 721, 723, 725
Гончарова П.С. 87
Горбатова А.В. 479
Горбач Д.В. 161
Горбьяк В.В. 65, 491
Горелик В.С. 205
Городецкий М.Л. 195, 201, 591
Городницкий А.С. 195
Горяев М.А. 605, 607
Горячий Д.О. 73
Гошев А.А. 187
Грачёв Я.В. 113
Гребенников Е.П. 429
Грецева И.Г. 71
Григорьев Р.О. 577
Григорьева А.А. 491
Гризбил Б.А. 687
Гришаев Р.В. 545
Гришин С.Г. 55
Губин В.П. 333, 337
Губин М.Ю. 165
Гуляев С.Н. 153

-Д-

Давыдов В.Н. 485
Даукша А.Ю. 587
Дворниченко М.Е. 715
Дегадникова Л.А. 221
Дегтерев А.Э. 63
Дедиу В.А. 37
Демидов В.В. 193
Демченко П.С. 577
Денисов Д.Г. 219, 223, 645
Денисюк И.Ю. 101
Державец Л.А. 561
Джаманкызов Н.К. 275, 703
Дзядух С.М. 405
Дивочий А.В. 465
Диденко Н.В. 147
Дирко В.В. 405
Дмитриев А.Д. 411
Долганов В.К. 97
Долганов П.В. 97
Долгополов И.С. 327
Долгушкин Д.А. 567
Долин А.А. 649
Долотов С.М. 203
Доненко И.Л. 671
Доржуева Г.Д. 433

Дорохов В.Л. 555
Доценко С.Э. 361
Дронова М.Г. 419
Дружин В.В. 265, 709
Дубровин В.Д. 401
Дубынин С.Е. 265, 683
Дудкина Т.Д. 417
Дудова Д.С. 595
Дьякова Ю.А. 105, 109
Дьяченко А.А. 681
Дюрягина А.Б. 271
Дягилева Д.В. 395

-Е-

Евтихийев Н.Н. 565, 575
Евтихьева О.А. 231
Егоров А.Н. 147
Егорышева А.В. 417
Ежов А.А. 67
Ежов В.А. 679
Елисеев М.А. 611
Елистратова Е.А. 193
Елютин С.О. 171
Елопов А.В. 67
Епифанов Е.О. 79, 83
Еремеев М.А. 63
Еремина Е.А. 501
Ермаков Р.П. 379
Ермакова М.В. 99
Ершов А.Е. 471
Есеев М.К. 181, 187
Ефименков Ю.Р. 625
Ефимова А.И. 463
Ефимова К.В. 637

-Ж-

Жанг К.-Ч. 167
Жданова К.Д. 145
Жевайкин К.Е. 101
Желлов М.А. 643
Жеенбаев Н.Ж. 433, 487
Железнов В.Ю. 157
Железный М.В. 297
Жигалов В.А. 259
Жигарьков В.С. 207
Жигунов Д.М. 67
Житов В.А. 599
Жихорева А.А. 699
Жукова М.О. 113
Жумабай Н.Д. 451
Жумабеков А.Ж. 617

Журавлев С.Д. 687

-З-

Забалуева З.А. 457
Заботнов С.В. 463
Завгородний А.В. 603
Загидулин А.В. 197
Задорожная Л.А. 535
Задорожный О.Ф. 485
Заев Д.А. 123
Зажогин А.П. 549, 561, 571
Зайцев В.Б. 67
Заклдаев Р.А. 551
Замятин А.А. 359
Заровский А.И. 555
Зарубин В.П. 207
Захаренко А.А. 577
Захаров Л.Ю. 599
Захаров С.М. 691, 693
Звайгзне М.А. 445
Звягин А.И. 71, 75, 441
Зеленер Б.Б. 211
Землянов А.А. 213, 533
Земцов Д.С. 61, 377
Злоказов Е.Ю. 61, 377
Золчина К.А. 317
Золотов Ф.И. 425
Золотовский И.О. 363
Зыкова Л.А. 227
Зырянова К.С. 489, 493

-И-

Ибраев Н.Х. 451, 455, 609, 615, 617
Иванов А.Ю. 587
Иванов Б. 627
Иванов В.И. 601
Иванов Д.М. 661
Иванов П.А. 279
Иванов С.И. 59
Иванова А.И. 89
Иванова А.К. 81
Иванова Г.Д. 415, 525
Ивэн Е. 167
Игнатъев А.И. 155, 401
Измайлов И.В. 375
Изотова О.А. 697
Ильин А.С. 133
Ильина К.Б. 105, 109
Ильина Н.С. 685
Ионин А.А. 81, 103, 315, 537
Ионов А.С. 335

Исаев В.А. 35
Исмаилов Ш.М. 633
Исманов Ю.Х. 275, 695, 703

-К-

Кадетова А.В. 91
Кадриев О.Р. 335
Казанцева Е.В. 183
Кайтуков Ч.Б. 263
Калугин А.И. 427
Каменев В.Г. 277, 633, 715
Каменев О.Т. 655
Каменева Н.А. 277
Каминская Т.П. 459
Камынин В.А. 657
Каплунов И.А. 89, 531, 559
Каракчиева О.С. 367, 635
Карандин А.В. 41
Каргин Ю.Ф. 309
Карпов О.Н. 67
Карпов С.Н. 165
Кастелик Ж.-К. 31
Кашаев Ф.В. 449, 459
Ким Ж.Г. 563
Киняевский И.О. 103, 315, 537
Киреева Н.М. 87
Кистенева М.Г. 309
Кишкин С.А. 247, 637
Климачев Ю.М. 103, 315, 537
Климин С.А. 287, 313
Климов Е.А. 475
Климонский С.О. 501
Князьков А.В. 301
Коваленко А.А. 565
Ковальска Е. 113
Ковальчук М.В. 105, 109
Ковтанюк А.Е. 563
Кожеватов И.Е. 539
Кожевников В.А. 547
Кожина А.С. 517
Козлов А.Б. 49
Козлов А.В. 735
Козлов А.Ю. 103, 315, 537
Козлов С.А. 167, 383
Козловский К.И. 477
Коканян Э.П. 295
Колегов А.А. 197
Колесников А.И. 89
Колесников А.О. 215
Колесниченко А.А. 649

- Колосовский А.О. 35
Колчин А.В. 449, 459
Колчин С.С. 559
Колчинский В.А. 619, 623, 655
Колядин А.Н. 191
Комарецкий В.М. 553
Комельков А.С. 555
Комиссар Д.А. 125, 423
Комоцкий В.А. 217
Компанец И.Н. 679
Конарев П.В. 105
Кондратенко Т.С. 441
Кондрашов А.А. 649
Конеев Р.В. 511
Конин Ю.А. 135
Коновалов А.Н. 539
Копаев И.А. 53
Копёнкин С.С. 265, 683, 709
Копылов Д.А. 311
Коренский М.Ю. 593
Коркишко Ю.Н. 295
Корнилова Е.С. 699
Коробков В.В. 233
Коробков К.А. 643
Королев С.Б. 189
Королева А.В. 133
Коршунов В.М. 73
Корыстов Д.Ю. 593
Косолапов А.Ф. 191
Кострицкий С.М. 295
Котков А.А. 103, 315
Котковский Г.Е. 117, 477
Котов В.М. 43, 599
Котова С.П. 247, 637
Коханенко А.П. 405
Кравец К.Ю. 569
Красников И.В. 563
Краснов В.В. 285, 733, 737, 739, 741
Кривенков В.А. 395
Кривова Г.М. 125, 423
Криштоп В.В. 87, 515
Крупина Н.В. 583
Крылов В.И. 453
Крымский М.И. 559
Крюкова И.С. 477
Кудинов О.Б. 677
Кудрявцев А.В. 421
Кудрявцев П.С. 237
Кудрян Н.В. 267
Кудряшов С.И. 81
Кузикова А.В. 577
Кузицин Ю.А. 117
Кузнецов А.А. 353
Кузнецов В.В. 639
Кузнецов П.И. 599
Кузнецов С.А. 111
Кузнецова О.Б. 469
Кузьмин Д.В. 157
Кузьмин И.И. 589
Кузьмин Н.Н. 95, 299
Кулаков М.Н. 731
Кульпина Е.В. 493
Кульчицкий Н.А. 393
Куплевич М.А. 331
Купрейчик М.И. 45
Куприянова О.С. 595
Куракина Д.А. 449
Курасова А.П. 577
Курбатова Е.А. 727
Курилкин В.В. 297
Куркин Г.Я. 555
Куркотов А.Д. 453
Курочкин В.Л. 379
Курочкин Ю.В. 379
Куртишов И.А. 381
Кучеренко М.Г. 403, 439, 467, 473, 483
- Л-
- Лавриков А.С. 535
Лавров А.П. 59
Лавров С.Д. 421, 431, 625
Лазарев В.А. 567
Ламкин И.А. 63, 409
Лалин Б.П. 345
Лалин В.А. 363
Лалтинская Т.В. 501
Лалишин К.Э. 593
Ласткин В.А. 335
Латушкин А.А. 713
Лебедев В.Ф. 199
Левин Г.Г. 225
Левченко К.С. 429
Лексин А.Ю. 165
Лентовский В.В. 127
Леонов С.О. 193, 205
Лесничий В.В. 271
Ливашвили А.И. 87, 515
Лин Й.-Ч. 251
Линде Б.Б.Ю. 33

Ло И. 619
Лобанов В.Е. 201
Логачева Е.И. 437
Лозовой К.А. 405
Ломкина А.В. 567
Лотков Е.С. 149
Луговской А.В. 47
Лукахин П.О. 689
Лукашова Т.О. 349
Лукиных С.Н. 57
Льюнг В.К. 551
Лычковский В.В. 549
Львов К.В. 175
Львова К.И. 265, 701, 709
Лю Ч. 237
Любимов А.И. 597
Люд П.Ц. 219
Лякин Д.В. 629
Ляликов А.М. 667, 711, 717
Ляо Д.-Д. 623
Ляшко Е.И. 171

-М-

Маврицкий О.Б. 147
Мавричев А.С. 561
Маймистов А.И. 171
Макаров А.И. 539
Макаров Д.Н. 181, 187
Макарова К.А. 181
Макин В.С. 437, 481
Макин Р.С. 437, 481
Маковецкий А.А. 359
Максименко В.А. 307
Максимова Л.А. 629, 681
Маликов Р.Ф. 185
Малинина П.И. 265
Малиновская Е.Г. 701
Мальшев А.В. 185
Мальшев В.А. 185
Мальцев П.П. 475
Мамонов Е.А. 145, 311
Мандель А.Е. 289
Манцызов Б.И. 169, 179
Маркова М.Д. 567
Маркушев В.М. 535
Мартынов И.Л. 117, 477
Марченкова М.А. 105, 109
Масалаева Н.И. 177
Маслова Г.Т. 561
Матророва А.С. 193

Маурер И.А. 153
Мачихин А.С. 49
Машко А.М. 435
Мащенко В.И. 99
Мезенцев Р.В. 309
Мейстерсон А.А. 435
Мелентьев П.Н. 435
Мелехов А.П. 553
Мельник М.В. 167, 383
Мельникова Е.А. 161
Менушенков А.П. 297
Меркалов А.С. 67
Миликов Э.А. 209
Минаев В.Л. 225
Минаев Н.В. 79, 83, 207, 595
Минаева Е.Д. 285
Минина Н.Е. 151
Минько А.А. 571
Миньков К.Н. 225
Миськевич А.И. 69
Митетело Н.В. 145
Митюрева А.А. 509, 517, 527
Михайлов И.И. 63
Мишина Е.Д. 115, 421, 475, 479
Мкртычев О.В. 85
Могильный В.В. 273, 675
Можаев Р.К. 343
Молодцов Д.Ю. 741
Молокова А.Ю. 297
Молчанов В.Я. 39
Молчанова А.Д. 95, 299
Морозов А.Б. 645
Морозов А.В. 265, 683, 701
Морозов А.Д. 209
Морозов О.Г. 353
Морозов П.В. 465
Моршнев С.К. 333, 337
Мосенцов С.Н. 373
Москалева К.С. 397
Москвин Н.В. 269
Мостовая Е.И. 659
Мошкова М.А. 465
Мулин П.В. 233
Мурашкина Т.И. 653
Мурзина Т.В. 145, 169, 311
Мухаматнурова А.Р. 589
Мысина Н.Ю. 629, 681
Мяготин А.В. 415

-Н-

Набиев И.Р. 395, 445
Надолинский А.М. 511
Назарова Д. 627
Назарова Д.А. 495
Налбандян В.М. 403, 483
Налегаев С.С. 251
Наний О.Е. 53, 57, 93, 137
Насонов А.А. 255
Наумов А.В. 393
Нащочин Е.О. 613
Нао В.В. 497, 499
Нго З.Т. 497, 499
Нуен Б.Х. 381
Нуен К.З. 551
Небаевский В.А. 61, 377
Небогин С.А. 557
Некрасов А.Д. 151
Немцев А.И. 495
Непомящая Э.К. 457
Нестеров В.А. 197
Неупокоева А.В. 557
Неясов П.П. 467
Никитин В.А. 331, 371
Николаев Н.А. 111
Николаев Н.Э. 143
Никоноров Н.В. 155, 193
Новиков В.Б. 169
Норматов А.Ж. 289
Носов П.А. 245
Нуреев И.И. 353
Нурмухаметов Д.И. 135
Нурсеитова А.М. 433, 487
Нурыев Р.К. 397

-О-

Образцова Е.Д. 413
Овеченко Д.С. 407
Овсейчук О.О. 525
Овсепян Р.К. 121
Овчинников О.В. 71, 75, 441
Оглуздин В.Е. 529
Одинокоев С.Б. 157
Окишев К.Н. 521
Оникиенко Е.В. 579
Орешкина К.В. 155, 401, 493
Орлов Ю.Д. 531
Осинцев А.В. 221
Осипов Е.В. 117, 477
Осминкина Л.А. 463

Осьмаков И.А. 373

-П-

Павликов А.В. 459
Павлов А.В. 241
Павлов И.Н. 689
Павлов К.В. 199
Павлов П.В. 269
Павлов С.В. 143
Павлова М.Д. 409
Павлюковец С.А. 571
Палатников М.Н. 91, 205, 287, 291, 293
Панфилов Ю.В. 149
Парфентьева В.Б. 657
Паршин В.А. 231
Патапович М.П. 571
Паулак Х.А. 217
Пахлавонова К.Д. 329
Пекаревич В.В. 161
Пелипенко В.И. 555
Пен Е.Ф. 707
Пенто А.В. 569, 589
Пеньков С.А. 473
Перевозникова А.С. 265, 683, 701, 709
Перепелица А.С. 75, 441
Перин А.С. 303
Перченко Е.М. 129
Петров Н.В. 251, 677, 713
Петров Н.И. 173, 365
Петров О.А. 611
Петров Ю.С. 655
Петрова Е.К. 723
Петрова М.С. 327
Петухов В.А. 203
Печенкин А.А. 343
Печинская О.В. 641
Пикуль О.Ю. 293
Писарева Е.В. 573
Писаревский Ю.В. 105, 109
Пискунов Д.Е. 245
Пичугин И.С. 155, 401
Плеханов А.А. 477
Плёткин А.П. 381
Подкопаев А.В. 69
Подлесная А.С. 57
Подлесных А.А. 655
Подсвилов О.А. 495
Пожар В.Э. 49
Пойзнер Б.Н. 375
Полетаев Д.А. 367

Поляков А.В. 141, 651
Понкратов К.В. 297
Пономарев А.Г. 427
Пономарев Н.М. 261, 281, 721, 723, 725
Пономарева Е.А. 167
Попов В.В. 297
Попов М.Е. 145
Попов С.М. 35
Попова А.В. 87
Поройков А.Ю. 685
Порошин Н.О. 429
Пости И.М. 165
Потемкин Ф.В. 175
Пржиялкоевский Я.В. 333, 337
Привалов В.Е. 547
Проклов В.В. 47, 369
Прокопиев Н.Н. 305, 327
Прокопова Д.В. 637
Просовский О.Ф. 223
Просовский Ю.О. 223
Прохоров А.В. 165
Прохоров И.В. 563
Прудников И.Р. 319
Путилин А.Н. 243, 265, 683, 701
Путилин С.Э. 167, 251, 383
Пушкарёв С.С. 475

-Р-

Равин А.Р. 329
Рагозин Е.Н. 215
Ракович Ю.П. 395
Рамакоти Р.Ш. 553
Расковская И.Л. 689
Распутный А.В. 311
Расказов И.Л. 471
Резвов Ю.Г. 369
Рогалин В.Е. 559
Рогачев А.В. 109
Рогожников Г.С. 51
Родин В.Г. 285, 741
Родионов И.А. 149
Родриго Х.А. 159
Розанов А.М. 241
Романов В.В. 51
Романов Н.Р. 425
Ромашко Р.В. 619, 623
Ружицкая Д.Д. 661
Русакова М.С. 247
Русинов А.П. 447
Рухленко И.Д. 443

Рыбась А.Ф. 339, 579
Рыжиков И.А. 149
Рыжиков С.Б. 661, 673
Рыжикова Ю.В. 661, 673
Рыжов И.В. 185
Рымов Д.А. 729
Рыскул кызы Г. 487
Рябочкина П.А. 417
Рябухо В.П. 253, 629, 687, 697
Рябухо П.В. 629
Рябцев И.П. 737
Рямбов Р.В. 213, 533
Ряховский Д.В. 359

-С-

Саакян С.А. 211
Савин К.А. 129
Савич Д.Е. 87
Савченко Е.А. 469
Савченков Е.Н. 289
Сагитова А.М. 103, 315, 537
Садыкова А.Е. 615, 617
Саенко И.И. 59
Сазонов А.И. 337
Сазонов С.В. 163
Салова А.В. 699
Салецкий А.М. 323, 411
Самохвалов П.С. 395, 445
Самохина К.С. 647
Сапарина С.В. 461
Сапронов М.В. 235
Сарыбаева А.А. 283
Саутенков В.А. 211
Сахабутдинов А.Ж. 353
Сахаджи Г.В. 687
Сахончик Д.Г. 651
Свяховский С.Е. 323
Севостьянов О.Г. 295
Селезнев Л.В. 315
Селиверстова Е.В. 451, 615, 617
Семенов В.Г. 209
Семенов М.А. 203
Семенова И.В. 699
Семенова Л.Е. 519
Семенцов Д.И. 363
Семенча А.В. 419
Семёнова О.И. 107
Сенюк А.В. 577
Серегин А.Ю. 109
Сетейкин А.Ю. 563

Сибгаатуллин М.Э. 585
Сидоров А.И. 65, 491, 495, 497, 499
Сидоров А.И. 569
Сидоров Н.В. 91, 205, 287, 291, 293
Сидорова О.В. 91
Силин Д.Е. 539
Сим Е.С. 309
Симаков С.Р. 525, 601
Синёв Д.А. 551
Синицын Д.В. 103, 315, 537
Ситников Н.Н. 99, 325
Скобёлкина А.В. 449, 459
Скорнякова Н.М. 235
Скрынник А.А. 229
Смирнов А.П. 607
Смирнов В.В. 513, 517, 527
Смирнов Д.В. 509
Смирнов К.В. 425, 465
Смирнов М.С. 71, 75, 441
Смирнов С.В. 167
Соболев Д.И. 397
Соболь Э.Н. 565
Соколенко Б.В. 339, 367, 635
Соколов И.В. 177
Соколов П.П. 705
Соколов Ю.М. 217
Соколовская О.И. 77
Соснин Э.А. 375
Софиенко Г.С. 197
Станкевич А.И. 273, 675
Старииков Р.С. 61, 261, 281, 377, 721,
723, 725, 731
Старииков С.С. 135
Старостин Н.И. 333, 337
Старцев В.В. 389, 393
Старцева Е.Д. 575
Старых Д.Д. 137
Стебунов Ю.В. 125, 423
Стойкова Е. 627
Стремоухов С.Ю. 175
Строкова Ю.А. 323
Субатович А.Н. 573
Суетин Н.В. 217
Сундеев Р.В. 325
Суриц В.В. 305
Сухарева Н.А. 249
Сухорукова О.Б. 511
Сырников Д.А. 453
Сьюй А.В. 87, 291, 305, 327, 613

-Т-

Тайдаков И.В. 73
Талайкова Н.А. 253
Тарасенко А.Б. 209
Тарасов А.П. 535
Тарасов С.А. 63, 409
Таратынова А.Д. 417
Телешевский В.И. 55, 229
Темирбаева Д.А. 609
Тепляков Н.В. 443
Теплякова Н.А. 91, 293
Терентьев Р.В. 201, 591
Тимофеев И.В. 119
Тимченко Е.В. 567, 573, 581
Тимченко П.Е. 567, 573, 581
Титова А.В. 561
Титова А.О. 267
Тихов И.С. 581
Тихомиров С.А. 71
Тихомирова Г.П. 567
Ткаченко Н.Б. 77
Толстик А.Л. 161
Третьяков С.А. 89
Трещиков В.Н. 53, 57, 93, 137
Трикшев А.И. 657
Трифонов А.В. 213, 533
Трофимов Н.С. 123, 329
Трофимова О.Н. 563
Троценко Н.А. 721, 725
Трубецкая А.С. 561
Трухина А.И. 341, 347
Туровцев В.В. 531
Тынышова Т.Д. 695

-У-

Уколов Д.С. 343
Ус Н.А. 259
Устинов А.С. 463

-Ф-

Фазлиев Т.Ш. 721, 725
Федин А.В. 199, 543
Федоров В.А. 295
Федоров Д.О. 593
Федорова Я.В. 573
Федотов П.В. 413
Фёдоров А.В. 443
Филатов А.Л. 611, 621
Фокина М.И. 101
Фомиряков Э.А. 349
Фотиади А.А. 35

Фролов О.О. 581

-Х-

Хабибуллина И.А. 99, 325
Хазвалиева Д.Р. 153
Халилов С.И. 267, 339, 367
Халыпин В.А. 503
Хамадеев М.А. 317, 321
Хамид А.Х. 577
Харасов Д.Р. 349
Харинцев С.С. 461
Хатыров Н.П. 541
Хафизов И.Ж. 61, 377
Хилов А.В. 449
Хныкина К.А. 583
Хоган Б. 113
Ходзицкий М.К. 577
Хопёрский А.Н. 511
Хохлов Д.Д. 49
Храмов В.Н. 631
Храмов Е.В. 297
Хрущалина С.А. 417
Хурчак А.П. 677, 713
Хусяинов Д.И. 115, 479

-Ц-

Царенко Н.А. 297
Цветков Д.М. 179
Цветков М.Ю. 83
Цыпкин А.Н. 113, 167, 383

-Ч-

Чаймарданов П.А. 355
Чаморовский Ю.К. 35
Чеботарев И.А. 537
Чернов А.И. 413
Черняк М.Е. 343
Чехлова Т.К. 123, 143, 329
Черёмхин П.А. 285, 727, 729, 731, 735, 741
Чжэн Ч.-Ж. 251
Чиркова И.М. 295
Чистяков А.А. 117, 477
Чичева П.А. 429
Чмерева Т.М. 439, 483
Чудов К.А. 429

-Ш-

Шавкута Б.С. 595
Шайтанов Д.В. 669
Шампань Ж. 39
Шандаров С.М. 289, 309
Шандрюк Г.А. 67
Шапиро Б.И. 151

Шарогазова В.В. 379
Шатохин А.Н. 215
Шахно Е.А. 551
Шачнева Е.А. 653
Шевкунов И.А. 251
Шеляков А.В. 99, 325
Шестакова А.П. 421, 431, 625
Шестериков А.В. 165
Шитиков А.Е. 195, 201, 591
Шифрина А.В. 285, 733, 739
Ших Ч.-Х. 619
Шихалиев И.И. 137
Шкердин Г.Н. 43
Шмелин П.С. 429
Шныров С.Л. 649
Шостка В.И. 635, 665
Шостка Н.В. 367, 635, 665
Штарев Д.С. 613
Штарева А.В. 613
Штумпф С.А. 167
Шубный А.Г. 79, 83
Шулейко Д.В. 459
Шур В.Я. 289
Шурыгина Н.А. 271

-Щ-

Щербакова В.А. 135
Щетинин А.В. 93
Щетинин И.В. 297

-Э-

Эргашев Ж.Т. 289
Эрькин И.Ю. 733

-Ю-

Юлкова В.М. 187
Юрина У.В. 495
Юсупов В.И. 207
Юрлов И.А. 417
Юшкевич В.В. 147
Юшков К.Б. 39, 51

-Я-

Яблокова А.А. 245
Яворский М.А. 345
Ягофарова Е.Ф. 581
Яковенко Н.А. 331, 371
Якубовский Д.И. 125, 423
Якушенков П.О. 505
Яновский А.В. 263
Янукович Т.П. 141
Ярославский И.В. 565
Ящук О.И. 515