

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
XXXII МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКОЛЫ-СИМПОЗИУМА
ПО ГОЛОГРАФИИ, КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИКЕ И
ФОТОНИКЕ**

30 мая – 3 июня 2022 г.

ИТМО



HOLOSCHOOL

Санкт-Петербург
2022

УДК 004, 517, 532, 535:539, 53.06, 53.08, 544, 57.08, 616, 621.3, 62-5, 666.1, 681.7
ББК 22.34

Сборник научных трудов XXXII Международной школы-симпозиума по голографии, когерентной оптике и фотонике (30 мая – 3 июня 2022 г.) / под ред. д.ф.-м.н. Петрова Н.В. – СПб.: Университет ИТМО, 2022. – 218 с.

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на тридцать второй (XXXII) Международной Школе-симпозиуме по голографии, когерентной оптике и фотонике, проходившей с 30 мая по 3 июня 2022 г., по тематикам: сингулярная оптика и структурированный свет; материалы для голографии и фотоники; цифровая голография; методы фотоники и голографии в биологии и медицине; когерентная и нелинейная оптика; голографическая и спекл-интерферометрия.

ISBN 978-5-7577-0675-7

ИТМО

Университет ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). Представлен в мировом ТОП-200 по телекоммуникационным технологиям (Telecommunication engineering), а также в ТОП-300 по нанонаукам и нанотехнологиям (Nanoscience & Nanotechnology) ARWU. Входит в ТОП-200 по инженерным наукам (Engineering and Technology), в ТОП-300 по физике и астрономии (Physics & Astronomy), наукам о материалах (Materials Sciences), а также по машиностроению, аэрокосмической и промышленной инженерии (Mechanical, Aeronautical & Manufacturing Engineering) рейтинга QS. Лидер проекта «Приоритет - 2030».

© Университет ИТМО, 2022

© Авторы, 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

по направлениям сингулярная оптика и структурированный свет; материалы для голографии и фотоники; цифровая голография; методы фотоники и голографии в биологии и медицине; когерентная и нелинейная оптика; голографическая и спекл-интерферометрия

Председатель редколлегии:

ведущий профессор, д.ф.-м.н. Петров Николай Владимирович

Члены редколлегии:

научный сотрудник, к.ф.-м.н. Белашов Андрей Владимирович

старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. Балбекин Николай Сергеевич

инженер, аспирант Рабош Екатерина Владимировна

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит материалы лекций заслуженных ученых и результаты научных работ молодых ученых, доложенные на тридцать второй (XXXII) Международной школе-симпозиуме по голографии, когерентной оптике и фотонике, проходившей с 30 мая по 3 июня 2022 г., по тематикам: сингулярная оптика и структурированный свет; материалы для голографии и фотоники; цифровая голография; методы фотоники и голографии в биологии и медицине; когерентная и нелинейная оптика; голографическая и спекл-интерферометрия.

Конференция проводится в целях ознакомления обучающихся и молодых ученых с современными голографическими принципами (методами) и подходами для решения различных узкоспециализированных и междисциплинарных задач в области голографии, когерентной оптики и фотоники, а также для формирования у студентов, аспирантов и молодых ученых понимания необходимости применения данных принципов, методов и подходов.

Содержание

ЛЕКЦИИ ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ	10
Крайский А.В. Об истории голографии и наших школах к 75-летию возникновения идеи голографии.....	11
Дёмин В.В. Цифровая голография частиц.....	13
Воляр А.В., Абрамочкин Е.Г., Брецько М.В., Акимова Я.Е., Егоров Ю.А. Структурированные вихревые пучки и быстрые осцилляции орбитального углового момента.....	16
Гужов В.И., Ильиных С.П., Захаров К.В., Майер О.Ю. Новый алгоритм восстановления изображения из цифровой голограммы на основе субпиксельной дискретизации с помощью обобщенных функций.....	22
Крайский А.В., Крайский А.А. Некоторые проявления резонансных свойств слоистых периодических сред при распространении волн (формирование запрещенной зоны, окна прозрачности, «медленный свет», повышение выхода ядерной DD реакции)	24
Никонов Н.В. Роль оптических стекол для фотоники и голографии в XXI веке	27
Толстик А.Л. Метод динамических решеток для диагностики функциональных материалов	31
Каленков С.Г. Регистрация цифровых объемных голограмм.....	33
Рябухо В.П. Мгновенные флуктуации и пространственная когерентность волнового поля протяженных источников света.....	36
Мачихин А.С. Мультиспектральная цифровая голографическая микроскопия на основе акустооптической фильтрации излучения.....	38
Левин Г.Г., Самойленко А.А. Оптический абсорбционный микротомограф для измерения локальных неоднородностей в биологических микрообъектах	41
Захаров Ю.Н. Голографическая сканирующая микроскопия	43
Погода А.П., Петров В.М. Внутррезонаторные голографические решетки и лазеры с управляемым спектром на их основе	45
Павлов А.В. Голографические методы моделирования принятия решений в противоречивых условиях.....	48
СИНГУЛЯРНАЯ ОПТИКА И СТРУКТУРИРОВАННЫЙ СВЕТ	50
Осинцева Н.Д., Чопорова Ю.Ю., Князев Б.А., Герасимов В.В., Павельев В.С. Мультиплексирование и идентификация оптических вихрей в интерферометре Маха-Цендера	51
Савельева А.А., Козлова Е.С. Вихревые лазерные пучки с квадратом полинома Лагерра	53
Шкуратова В.А., Костюк Г.К., Петров А.А. Многосекторные бинарные фазовые пластины для генерации суперпозиции вихревых пучков.....	56
Зайцев В.Д., Стафеев С.С. Вектор Стокса вблизи фокуса лазерного пучка с линейной поляризацией.....	58
Проколова Д.В., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Котова С.П. Применение двухлепестковых световых полей с вращением распределения интенсивности в задачах оптической манипуляции	60

XXXII Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике

Плаченев А.Б., Киселев А.П. Квадратичные пучки Бесселя-Гаусса и разложение астигматического гауссова пучка в ряд Фурье по угловой переменной	62
Со И.А., Плаченев А.Б., Киселев А.П. Простые однонаправленные малоцикловые электромагнитные импульсы.....	64
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ И ФОТониКИ	66
Зюбин А.Ю., Кон И.И., Кундалевич А.А., Демишкевич Е.А., Зозуля А.С., Евтифеев Д.О., Самусев И.Г. Оптические свойства планарных плазмон активных поверхностей модифицированных золотыми нанозвездами	67
Крайский А.А., Крайский А.В. Метод аналитического описания волны в слое периодической слоистой среды с частотой вблизи запрещенной зоны и его применение к расчету увеличения выхода DD-реакций в кристалле и скорости прохождения импульса сквозь фотонный кристалл .	69
Кузнецова Ю.А., Зацепин Д.А., Зацепин А.Ф., Гаврилов Н.В. Люминесценция дефектов и экситонов в пленках Y_2O_3 с моноклинной структурой	71
Безпальный А.Д., Быков В.И., Мандель А.Е. Оптические волноводные структуры, индуцированные в кристалле ниобата лития с поверхностным легированием	73
Долгирев В.О., Шарангович С.Н. Моделирование нелинейного процесса голографического формирования многослойных неоднородных дифракционных структур в КПЖК	75
Шилов А.О., Камалов Р.В., Чукин А.В., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. Спектрально-кинетические особенности термостимулированной люминесценции в УФ-облученных нанотрубках диоксида гафния	78
Даденков И.Г., Толстик А.Л., Миксюк Ю.И., Саечников К.А. Импульсная запись динамических голограмм в кристалле силиката висмута в широком диапазоне длин волн	80
Могильный В.В., Храмцов Э.А., Шкадаревич А.П. Полимерная композиция с фенантренхиноном для записи рельефных голографических решеток	82
Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В. Тонкие рельефные голографические решетки на светочувствительных материалах на основе бихромированного желатина	85
Иванов С.А., Мусихина Е.С., Никоноров Н.В. Волноводная система ввода/вывода на основе фото-термо-рефрактивного стекла для AR/MR устройств	87
Долгирев В.О., Шарангович С.Н. Исследование дифракции света на многослойных неоднородных голографических дифракционных КПЖК структурах, сформированных при линейном и нелинейном режимах записи	89
Ахметов Д.М., Харитонов Д.Ю. Учет технологических ограничений при расчете оптической схемы дисплея с композитной голограммой.....	92
ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ	95
Ольшуков А.С., Дёмин В.В. Определение характеристик капель методами цифровой голографии	96
Юдин Н.Н., Дёмин В.В., Грибенюков А.И., Половцев И.Г., Подзывалов С.Н., Зиновьев М.М., Слюнько Е.С., Ольшуков А.С., Давыдова А.Ю. 3D картирование включений в оптических материалах с применением ИК цифровой голографии	98
Давыдова А.Ю. Когерентность в цифровой голографии частиц	100

XXXII Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике

Юдин Н.Н., Павлов П.В., Дёмин В.В., Половцев И.Г., Кусков И.Э., Вольф И.Э., Евсин А.О., Балашов А.А., Костин А.С., Подзывалов С.Н., Зиновьев М.М. Определения размеров поверхностных дефектов авиационного стекла в трехмерном пространстве методом цифровой голографии.....	102
МЕТОДЫ ФОТониКИ И ГОЛОГРАФИИ В БиОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ	104
Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Беляев А.В., Святкина В.И. Совместное применение телевизионного и многоспектрального методов для эндоскопической диагностики рака внутренних органов	105
Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Рогов С.А., Кордюкова А.А., Колесов В.М. Применение методов фотоники для обработки биоэлектрических сигналов	108
Белашов А.В., Жихорева А.А., Беляева Т.Н., Литвинов И.К., Салова А.В., Семенова И.В., Корнилова Е.С., Васютинский О.С. Применение внеосевой и низкокогерентной цифровой голографической микроскопии для анализа резистивности живых клеток к фотодинамическому воздействию.....	116
Красников И.В., Сетейкин А.Ю., Рот Б. Современные подходы применения методов математического моделирования в биомедицинских исследованиях	118
Ляхов К.А., Григорьев В.А., Циплакова Е.Г. Эволюция распределения электрического поля на поверхности КМОП структуры в конфокальном лазерном томографе.....	120
Хорин П.А., Хонина С.Н. Моделирование компенсации волновых aberrаций роговицы миопического глаза человека.....	123
Милантьев С.А., Кордюкова А.А., Шевяков Д.О., Логачев Е.П. Применение нейросетевых технологий и компьютерного зрения для анализа изображений кожных новообразований	126
КОГЕРЕНТНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА	128
Савельев М.В., Гонзалез Ф.А.Х. Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения в поглощающей двухкомпонентной среде с учетом поля тяжести Земли.....	129
Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А., Андреев Ю.М., Николаев Н.А. Спектроскопия нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в качестве источников интенсивного терагерцового излучения	131
Матвеева К.И., Зюбин А.Ю., Кон И.И., Самусев И.Г. Влияние ориентации сфероидальных наноструктур на распределение электрического поля в вопросах усиления интенсивности комбинационного рассеяния света	134
Ивахник В.В., Воробьева Е.В., Капизов Д.Р. Четырехволновое взаимодействие в параболическом волноводе на резонансной нелинейности	136
ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ	140
Владимиров А.П. Спекл-фотоника некоторых необратимых процессов живой и неживой материи	141
Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е., Наумов К.В. Сравнение данных двух спекловых методов, использованных для изучения многоциклового усталости металла.....	144

XXXII Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике

Павлов П.В., Владимиров А.П., Степанов А.Р. Использование метода спекл-структур оптического излучения для определения дефектов в структуре авиационного органического стекла и в заделке кабины воздушного судна.....	146
Михайленко Ю.А., Рогова Е.А., Владимиров А.П., Бахарев А.А., Сергеев А.Г., Белоконова Н.А. Исследование влияния токсических веществ на живые клетки методом динамической спекл-интерферометрии.....	148
Кожевникова А.М., Иванков А.С., Шитц Д.В., Алексеенко И.В. Применение методов цифровой голографической интерферометрии для исследования импульсной плазмы.....	150
Дьяченко А.А. Спектральные методы анализа интерференционных изображений слоистых микрообъектов в оптической микроскопии: влияние углового спектра освещения.....	153
Пазоев А.Л., Шойдин С.А. Передача 3D голографической информации по радиоканалу.....	156
Петрова Е.К., Гончаров Д.С., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю. Применение инвариантных фильтров для корреляционного распознавания изображений объектов на естественном многоцветном фоне.....	159
Лепаев А.Н., Ксенофонтов С.И., Васильева О.В. Оптическая обработка изображения факельного пламени распыленной жидкости.....	161
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ.....	163
Козлов А.В., Родин В.Г., Черёмхин П.А. Подавление шума регистрирующей камеры и спекл-шума в цифровой голографии 3D-медианной фильтрацией.....	164
Акимова Я.Е., Брецько М.В., Воляр А.В., Егоров Ю.А., Халилов С.И. Секторное возмущение спиральных вихревых пучков.....	166
Брецько М.В., Акимова Я.Е., Воляр А.В., Егоров Ю.А., Халилов С.И. Возмущение четырехугольного спирального вихревого пучка света непрозрачным экраном.....	169
Воляр А.В., Абрамочкин Е.Г., Брецько М.В., Акимова Я.Е., Егоров Ю.А. Быстрые осцилляции ОУМ при внутренних возбуждениях структурированного пучка, астигматические преобразования и их инварианты.....	172
Егоров Ю.А., Брецько М.В., Акимова Я.Е., Воляр А.В., Рыбась А.Ф., Халилов С.И. Генерация бесселевых пучков в полихроматическом свете.....	175
Владимиров А.П., Наумов К.В. Использование оптических методов для регистрации эпюр пластических деформаций и шероховатости на разных стадиях многоциклового усталости.....	178
Дю В.Г., Кистенёва М.Г., Вдовенко С.А., Жулин А.П., Шандаров С.М., Каргин Ю.Ф. Фотоиндуцированное поглощение в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$	180
Клычкова Д.М. Влияние ширины временного и углового спектров освещающего поля на зависимость контраста интерференционной картины от величины продольного смещения микрообъектива в равноплечном интерферометре Линника.....	183
Езерский А.С., Герасимов К.А. Анализ фазовых изображений, полученных при использовании голографической системы регистрации на основе эффекта геометрической фазы и поляризационной камеры.....	185
Борисов В.Н., Зверев А.Д., Камынин В.А., Копьева М.С., Окунь Р.А., Цветков В.Б. Характеризация голографического фотополимера Bayfol HX в ИК области.....	188

XXXII Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике

Деревеницкая Д.Д., Краснов В.В., Злоказов Е.Ю., Миниханов Т.З. Итерационный оптический синтез фазовых осевых голограмм Френеля в расходящихся пучках	191
Овчинников А.С., Краснов В.В., Савченкова Е.А. Сравнительный анализ эффективности методов бинаризации различных типов применительно к амплитудным дифракционным оптическим элементам без несущей пространственной частоты.....	193
Миниханов Т.З., Злоказов Е.Ю., Краснов В.В., Деревеницкая Д.Д. Исследование динамических характеристик фазовых ЖК ПВМС HoloEye PLUTO-2 VIS-016 и HoloEye GAEA-2 VIS-036...	195
Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Святкина В.И. Полихромный источник света для реализации многоспектрального метода обработки изображений кожных новообразований.....	198
Павлов И.Н., Расковская И.Л., Шитов С.А., Янина Г.М. Исследование диффузионного слоя жидкости методом лазерной рефрактографии	201
Федянина М.А., Балбекин Н.С., Пузановский К.В. Исследование температурной зависимости дисперсии показателя преломления стекла К8 в терагерцовом диапазоне	204
Ремзов А.Д., Савельев М.В. Сравнение пространственно-временных характеристик четырехволновых преобразователей излучения в прозрачных наножидкостях в поле тяжести Земли	207
Гаугель А.О., Павлов А.В. К вопросу аппроксимации характеристик схемы голографии Фурье	209
Прохорова А.В., Рабош Е.В., Черных А.В., Балбекин Н.С., Петров Н.В. Оцифровка объектной волны, восстановленной из аналоговой отражательной голограммы, методом цифровой голографии.....	211
Акбарова Н.А., Шишова М.В. Цифровая голографическая интерферометрия для измерения деформаций в разные промежутки времени	214
Циплакова Е. Г., Чопард А., Балбекин Н.С., Смолянская О.А., Перро Ж.-Б., Гийе Ж.-П., Моне П., Петров Н.В. Техника однократного сканирования в применении к задаче восстановления фазы из распределений интенсивности терагерцового диапазона частот	216

ЛЕКЦИИ ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ

УДК 535.8; 535.14

ОБ ИСТОРИИ ГОЛОГРАФИИ И НАШИХ ШКОЛАХ К 75-ЛЕТИЮ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИДЕИ ГОЛОГРАФИИ

Александр Владиславович Крайский

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

Аннотация

В настоящей работе кратко излагается история того, как появлялись знания, методы, приборы, которые служили созданию методов регистрации видимой людьми действительности в виде изображений не только выдающимися одиночками, но каждым индивидом. Это постепенно привело к возможности создания наиболее совершенного метода регистрации образа объекта – регистрации и воспроизведения поля, излучаемого (рассеянного) объектом, т. е. голографии. Излагается история появления и развития в СССР Школ по голографии, и рассказывается об их создателях

Ключевые слова

Голография, история, мотивы, школы по голографии

ABOUT THE HISTORY OF HOLOGRAPHY AND OUR SCHOOLS ON THE OCCASION OF THE 75TH ANNIVERSARY OF THE IDEA OF HOLOGRAPHY

Aleksandr V. Kraiski

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

This report outlines the history of how knowledge, methods, devices appeared that served to create methods for registering reality visible to people in the form of images not only by outstanding individuals, but by each individual. This gradually led to the possibility of creating the most perfect method for registering the image of an object - registering and reproducing the field emitted (scattered) by the object, i.e., holography. The history of the emergence and development of the Holography Schools in the USSR and their founders are described

Keywords

Holography, history, motives, schools of holography

Голография как отдельная область науки и практики началась с публикации Д. Габора 1948 г. [1]. Возникновение идеи голографии Габор отнес к 1947 г. [2]. Таким образом, в этом году голографии 75-лет. Первая Всесоюзная школа по голографии была проведена в январе 1969 года [3]. Школы сыграли определяющую роль в становлении голографии в стране и внесли существенный вклад в развитие голографии. Работа первых 20 Школ достаточно информативно освещена в сборниках Трудов школ, в статьях ректора первых 22 Школ Г.В. Скроцкого [4-6] и в фундаментальных Трудах 26-й Школы [7]. Там же приведена хронология всех 25 предыдущих Школ. Уточнение года проведения 22-й Школы, приведенного в [7], содержится в публикации автора настоящей работы [8]. Там же приведена хронология на тот момент всех 29 Школ.

Автору настоящей работы посчастливилось участвовать в работе Первой школы и в значительной части последующих. На следующих двух Школах: 30-ой (2 – 6 октября 2017 г., г. Калининград) и 31-ой (30 сентября - 4 октября 2019 года, Екатеринбург) автору была оказана честь сделать доклады по истории голографии [9-10]. Основными источниками сведений являются собственные впечатления о научной жизни в ФИАН, в голографическом сообществе и многочисленные беседы с друзьями и добрыми знакомыми. Здесь необходимо отметить важнейшую роль многих крайне интересных бесед с Д.И. Стаселько, который передал много сведений по истории голографии. Многое имеется

в интернете, основные из них приведены в списках литературы в настоящей статье и в [8–10]. Среди них выделяются работы основоположников голографии и фундаментальная работа эдинбургского историка голографии Sean. Johnston [11].

В основе концепции всех докладов автора лежала идея, что голография – это высшая ступень технических возможностей осуществления стремления людей запечатлеть визуально реальные объекты и события. Для лучшего понимания логики развития науки важно знать не только хронологию событий, но и побудительные мотивы поисков и взаимодействие с пограничными направлениями, и возможные применения. В [9] основная идея изложения материала сформулирована так «В настоящем докладе излагается история того, как появлялись знания, методы, приборы, которые служили созданию методов регистрации видимой людьми действительности в виде изображений не только выдающимися одиночками, но каждым индивидом. Это в процессе развития привело к возможности создания наиболее совершенного метода регистрации образа объекта – регистрации и воспроизведения поля, излучаемого (рассеянного) объектом, т. е. к голографии. Кратко рассматривая процесс приобретения знаний и разработки основных технических навыков человеком, показываются этапы этого пути ... (линзы, камера-обскура, фотохимия и фоторегистрирующие среды, дифракционные решетки, изучение взаимодействия волн с периодическими структурами)». Эта концепция сохранена и в докладе на 31-й Школе.

Литература

- [1] Gabor D. A new microscopic principle //Nature. – 1948. – V. 161. – P. 777–778.
- [2] Габор Д. Голография (1948—1971 гг.) //Успехи физических наук. – 1973. – Т. 109. – №. 1. – С. 5–30.
- [3] Всесоюзная школа по голографии, 1-я. Москва. 1969.: Материалы Первой Всесоюзной школы по голографии. 20–25 янв. 1969 г. – Л.: [Б.и.], 1971. – 520 с.
- [4] Скроцкий Г.В. Наши школы. Физические основы голографии // Материалы XI Всесоюзной школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ. 1979. – С. 5–17.
- [5] Скроцкий Г.В. Физические основы и прикладные вопросы голографии // Материалы XV Всесоюзной школы по голографии. – Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе. 1984. – С. 4–9.
- [6] BSFP.Media. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bsfp.media-security.ru/school20/01/> (дата обращения: 17.05.2022).
- [7] Малов А.Н. Школы по когерентной оптике и голографии: история // Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии / ред. проф., д.ф.-м.н. А.Н. Малов / Иркутск. высш. воен. авиац. инж. училище (Военный институт). – Иркутск: Папирус, 2008. – С. 12–34.
- [8] Крайский А.В. О школах по голографии // Изв. ВУЗ'ов ФИЗИКА. – 2015. – Т. 58. – №. 11/3. – С. 5–9.
- [9] Крайский А.В. Об истории голографии к ее 70-летию. XXX Школа по голографии, когерентной оптике и фотонике, 2–6 октября 2017 г., г. Калининград.
- [10] Крайский А.В. Об истории голографии (к 50-летию 1-ой Всесоюзной школы по голографии). //Материалы XXXI Международной школы-симпозиума по голографии, когерентной оптике и фотонике. – 2019, – С. 9–10.
- [11] Johnston Sean F. Holographic visions: a history of new science // Oxford University Press. Oxford, 2006 г. – p. 540.13.

УДК 535:778.38:004.932

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ ЧАСТИЦ

Виктор Валентинович Дёмин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация

Предмет исследования. Методы, возможности, особенности и применения цифровой голографии частиц как в лабораторных, так и в натуральных и производственных условиях **Метод.** ДНС-технология регистрации голограмм и извлечения информации, ее адаптация к условиям эксплуатации и натурным экспериментам.

Основные результаты. Примеры аппаратно-программной реализации технологии. **Практическая значимость.** Результаты практического применения для исследования планктона и других частиц в водных средах, а также неоднородностей и явлений оптического пробоя в оптических материалах

Ключевые слова

Цифровая голография частиц, применения цифровой голографии частиц, цифровая голографическая камера, натурные исследования

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030)

DIGITAL HOLOGRAPHY OF PARTICLES

Victor V. Dyomin

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

The subject. Methods, possibilities, features, and applications of digital particle holography both in laboratory and in full-scale and production conditions. **The method.** DHC-technology for recording holograms and extracting information, its adaptation to operating conditions and natural experiments. **Obtained results.** Examples of hardware-software implementation of technology. **Recommendation for their application.** Results of practical application for the study of plankton and other particles in aquatic environments, as well as inhomogeneities and optical breakdown phenomena in optical materials

Keywords

Digital holography, digital holography applications, digital holographic camera, in situ research

Acknowledgements

This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030)

Введение

Голографические методы применяются для исследования частиц различной природы в различных средах, при решении самых разнообразных задач – изучение процессов в аэрозолях [1], планктона, эритроцитов, других частиц в водных средах и физиологических жидкостях [2, 3], дефектов в твердых телах [4] и т. п. Во всех этих задачах голография позволяет зарегистрировать объем среды, а затем послойно восстановить его изображение и исследовать все частицы (аэрозольные частицы, капли, пузырьки газа, планктонные особи, неоднородности и т. п.), отличающиеся оптическими свойствами от самой среды. При этом обеспечивается возможность определить размеры, формы, локализацию каждой частицы, а при использовании временной серии голограмм – изучить их динамику, сформировать видео движения каждой частицы.

В случае цифровой голографии голограмма регистрируется на цифровом носителе (ПЗС или КМОП камере), а восстановление изображения производится численно, что

обеспечивает дополнительные возможности для обработки голографических изображений и передачи цифровых голограмм по линиям связи.

В настоящей работе приведен обзор методов, возможностей и особенностей цифровой голографии частиц, а также примеры их применения как в лабораторных, так и в натурных и производственных условиях.

ДНС– технология

В работе описан комплекс операций и методов, который мы называем ДНС-технология, ДНС–Digital Holographic Camera. ДНС-технология позволяет зарегистрировать и сохранить цифровую осевую голограмму объема среды, послойно численно восстановить голографическое изображение этого объема, получить трехмерные координаты каждой частицы, определить размеры, форму, скорость и направление движения каждой частицы и провести их распознавание, другими словами, создать виртуальный 3D-образ объема с исследуемыми частицами. При этом в программном обеспечении учитывается тот факт, что цифровая голограмма представляет собой двумерный массив дискретных квантованных значений распределения интенсивности, зарегистрированной на матричном приемнике. Технология полностью автоматизирована и включает: процесс предварительной обработки цифровой голограммы (удаление или выравнивание фона и подавление краевых шумов); восстановление из цифровой голограммы заданного количества изображений поперечных сечений исследуемого объема с частицами и построение его двумерного отображения; повышение качества и бинаризация 2D отображения; автоматическое выделение изображений частиц и определение характеристик каждой частицы, а также интегральных характеристик ансамбля частиц; распознавание планктонных частиц по основным таксономическим группам [5].

Инжиниринг цифровой голографической камеры

Для реализации описанной технологии разработано несколько модификаций цифровых голографических камер (ДНС) основанных на бескорпусной конструкции двух основных блоков – освещающего и регистрирующего, и на регистрации цифровой голограммы по осевой схеме. Корпусная часть и конструктивная реализация ДНС определяются условиями эксплуатации и обеспечивают оптическое сопряжение основных модулей и существуют в лабораторном и погружаемом исполнении. Модули имеют внутреннюю и внешнюю синхронизацию и подключение к вычислительным ресурсам по сети Ethernet. Это позволяет гибко использовать стандартные средства организации работы ДНС, дополнительные датчики, каналы связи и вычислительные ресурсы. Для описания изображающих свойств такой системы, калибровки и оценки разрешения нами предложено использование обобщенной эквивалентной двухкаскадной оптической схемы [6].

Обзор результатов применения цифровой голографии частиц

ДНС в прочных корпусах, разработанная в НИ ТГУ, предназначена для работы в составе погружаемых зондов [7, 8], где комплексировается с дополнительными датчиками для одновременной регистрации параметров среды. Такой комплекс позволяет решать различные задачи по *in situ* биоиндикации акваторий с использованием мониторинга характеристик автохтонного планктона. При этом волоконно-оптическая связь обеспечивает режим реального времени не только в создании потока голограмм с

планктоном, но и в аналитике мониторинговых данных. Последовательное использование атракторного для планктона и регистрирующего голограмму излучения позволяет исследовать поведенческие реакции планктона [9].

Мобильную лабораторную версию ДНС мы используем для организации технологического контроля качества оптических материалов в части диагностики включений в условиях промышленного применения. Здесь метод цифровой голографии в ИК диапазоне применяется для выявления объемных дефектов монокристаллов $ZnGeP_2$ и исследования явления оптического пробоя [10].

Заключение

В работе описан комплекс методов и операций (ДНС-технология) для голографического исследования частиц различного происхождения в различных средах, а также предложены соответствующие аппаратно-программные реализации. При этом цифровая голографическая камера может рассматриваться как изображающая оптическая система, предназначенная для отображения объемных сцен, а ее конструктивная реализация определяется условиями эксплуатации и существует в лабораторном и погружаемом исполнении.

Показано, что цифровая голография имеет значительные перспективы для исследования частиц в различных научно-технических, мониторинговых, экологических задачах.

Литература

- [1] Fugal J.P., Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2009. – V. 2. – Is. 1. – P. 259-271.
- [2] Watson J. Submersible digital holographic cameras and their application to marine science // *Optical Engineering*. – 2011. – V. 50. – Is. 9. – P. 091313.
- [3] Kumar V., Khan G.S., Shakher C. Phase contrast imaging of red blood cells using digital holographic interferometric microscope // *Third International Conference on Applications of Optics and Photonics*. – SPIE, 2017. – V. 10453. – P. 678-684.
- [4] Dyomin V. et al. Holography of particles for diagnostics tasks // *Applied Optics*. – 2019. – V. 58. – Is. 34. – P. G300-G310.
- [5] Dyomin V.V., Olshukov A.S., Davydova A.Y. Data acquisition from digital holograms of particles // *Unconventional Optical Imaging*. – SPIE, 2018. – V. 10677. – P. 696-706.
- [6] Dyomin V. et al. Digital hologram as a display optical system // *Practical Holography XXXV: Displays, Materials, and Applications*. – SPIE, 2021. – V. 11710. – P. 53-62.
- [7] Dyomin V. et al. Underwater Holographic Sensor for Plankton Studies In Situ including Accompanying Measurements // *Sensors*. – 2021. – V. 21. – Is. 14. – P. 4863.
- [8] Dyomin V. et al. Monitoring of plankton spatial and temporal characteristics with the use of a submersible digital holographic camera // *Frontiers in Marine Science*. – 2020. – V. 7. – P. 653.
- [9] Dyomin V. et al. Planktonic response to light as a pollution indicator // *Journal of Great Lakes Research*. – 2020. – V. 46. – Is. 1. – P. 41-47.
- [10] Dyomin V.V. et al. Visualization of volumetric defects and dynamic processes in crystals by digital IR-holography // *Applied Optics*. – 2021. – V. 60. – Is. 4. – P. A296-A305.

УДК 535.421

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВИХРЕВЫЕ ПУЧКИ И БЫСТРЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА

Александр Владимирович Воляр*, Евгений Григорьевич Абрамочкин**, Михаил Владимирович
Брецько*, Яна Евгеньевна Акимова*, Юрий Александрович Егоров*

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

**Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия

Аннотация

Рассмотрено возбуждение ЭГ мод в структурированных LG пучках таким образом, что амплитудный параметр ε меняет амплитуды массива HG мод, а фазовый параметр θ вносит кратную начальную фазу в каждую HG моду. Теоретически и экспериментально обнаружено, что в общем случае sLG пучок при кратных гармонических возбуждениях HG мод является суммой двух сингулярных пучков – стандартного LG пучка и гибридного HLG пучка. Быстрые осцилляции ОУМ связаны с перепутыванием радиальных n и азимутальных чисел в sLG пучке. Такое перепутывание не изменяет свойств собственных LG мод, но радикально изменяет свойства sLG пучка

Ключевые слова

Топологический заряд, структурная устойчивость, спиральный пучок, спектр вихрей

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Совета министров Республики Крым (№ 20–47–910002, № 20–37–90066, № 19–29–01233, № 20–37–90068)

STRUCTURED VORTEX BEAMS AND FAST OSCILLATIONS OF ORBITAL ANGULAR MOMENTUM

Alexander V. Volyar, Evgeny G. Abramochkin, Mikhail V. Bretsko, Yana E. Akimova, Yuri A. Egorov

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

**Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Abstract

The excitation of EG modes in structured LG beams is considered in such a way that the amplitude parameter ε changes the amplitudes of the array of HG modes, and the phase parameter θ introduces a multiple of the initial phase into each HG mode. It has been theoretically and experimentally found that, in the general case, an sLG beam under multiple harmonic excitations of the HG modes is the sum of two singular beams, a standard LG beam and a hybrid HLG beam. The fast oscillations of the OAM are related to the confusion of the radial n and azimuthal numbers in the sLG beam. Such entanglement does not change the properties of the LG eigenmodes, but radically changes the properties of the sLG beam

Keywords

Topological charge, structural stability, spiral beam, vortex spectrum

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (No. 20-37-90066, No. 19-29-01233, No. 20-37-90068) and the Council of Ministers of the Republic of Crimea (No. 20-47-910002)

Введение

Широкое использование семейства лазерных пучков со многими степенями свободы, получивших название структурированных вихревых пучков, предполагают возбуждение в каждом вихревом канале больших массивов данных [1]. Каждая степень свободы структурированного пучка может ассоциироваться с орбитальным (ОУМ) или спиновым

угловым моментом или же с собственными модами пучка (например, модами Лагерра-Гаусса (LG), Эрмита-Гаусса (HG), Айнса-Гаусса и т. д.). Но что представляет структурированный вихревой пучок, если говорить о нем простыми словами? Еще в далеком 1974 году, английские физики [2] описали характерные неоднозначные участки волнового фронта, которые назвали краевыми и винтовыми дислокациями волнового фронта по аналогии с дислокациями кристаллической решетки. В дальнейшем, с легкой руки украинского физика М. Соскина, винтовые дислокации стали называть оптическими вихрями из-за сходства их свойств с обычными вихрями в атмосфере и жидкости [3].

Используемые методы и подходы

Оптический вихрь представляет собой участок волнового фронта, где фаза неопределена, но напряженность поля равна нулю. Картина интенсивности единичного вихревого пучка показана на рис. 1а, а его волновой фронт принимает вид прямого геликоида (рис. 1б). Число ветвей геликоида называют топологическим зарядом (ТЗ). Если сложить два соосных лазерных пучка, один из которых переносит оптический вихрь, то сформируется спиральная интерференционная картина (рис. 1с). Если же сложить вихревой пучок с плоской волной, то возникнут интерференционные полосы с характерной вилкой, указывающей на положение оптического вихря (рис. 1д). Если определенным образом расположить вилки в цифровой голограмме (рис. 1е), то можно восстановить структурированный вихревой пучок, переносящий слово “РОССИЯ”. Такой один из первых структурированных пучков был создан еще в 1996 году российскими физиками Абрамочкиным и Волостниковым [4].

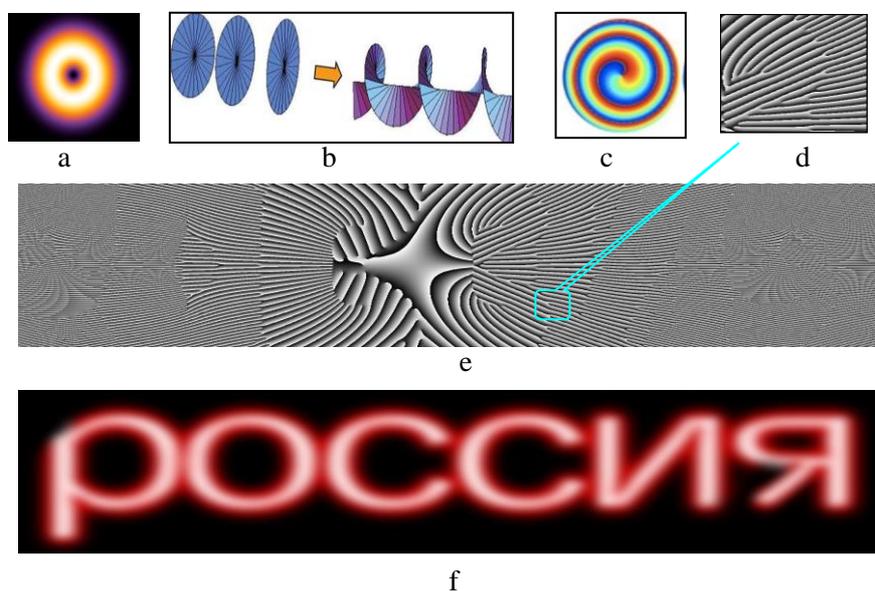


Рис. 1. Оптические вихри (a-d) и один из первых типов структурированных пучков (e, f): (a) картина интенсивности единичного вихря; (b) плоский и геликоидальный волновой фронт; (c) интерференционная картина оптического вихря; (d) цифровая голограмма структурированного пучка и (f) его картина интенсивности

Развитие цифровых технологий и изобретение пространственных модуляторов света с жидкокристаллической ПЗС матрицей позволило южноафриканскому физика Форбса разработать семейство структурированных пучков, способных переносить большие массивы данных [1]. Постараемся ответить на вопрос, что произойдет со

структурированным пучком, если в каждую его независимую моду ввести свой собственный массив информации? Передача массивов данных может осуществляться посредством кодирования ОУМ, энтропии Шеннона, амплитуд, фаз и поляризаций собственных мод структурированных пучков.

Одним из представителей одного из таких семейств являются структурированные пучки Лагерра-Гаусса (sLG), содержащих множество HG мод [5], комплексная амплитуда которых записывается как:

$$sLG_{n,\ell}(\mathbf{r} | \varepsilon, \theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2} n!} \sum_{k=0}^{2n+\ell} (-i)^k (-2)^k P_k^{(n+\ell-k, n-k)}(0) \varepsilon_k(\varepsilon, \theta) HG_{2n+\ell-k, k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $P_k^{(n,m)}$ – многочлены Якоби, ε_k – параметр возбуждения HG мод. В случае $\varepsilon_k = 1$, выражение (1) описывает стандартный LG пучок в HG базисе. При $\varepsilon_k \neq 1$ мы имеем дело с sLG, содержащим $2n+l$ степеней свободы в виде HG мод.

В данной работе мы рассматриваем в теоретическом и экспериментальном плане результат возбуждения в каждой HG моде кратных гармоник фазы, характеризуемых множителем $\varepsilon_k = (1 + \varepsilon \exp(ik\theta))$ [6], где ε и θ – амплитудный и фазовый параметр, соответственно, и проследим за результатом такого возбуждения. При этом основное внимание фокусируется на изменениях ОУМ, астигматичным преобразованием sLG и на инвариантах гармонических возбуждений и астигматических преобразований.

Основные результаты гармонического возбуждения HG мод в виде картин интенсивности и фазы приведены на рис. 2.

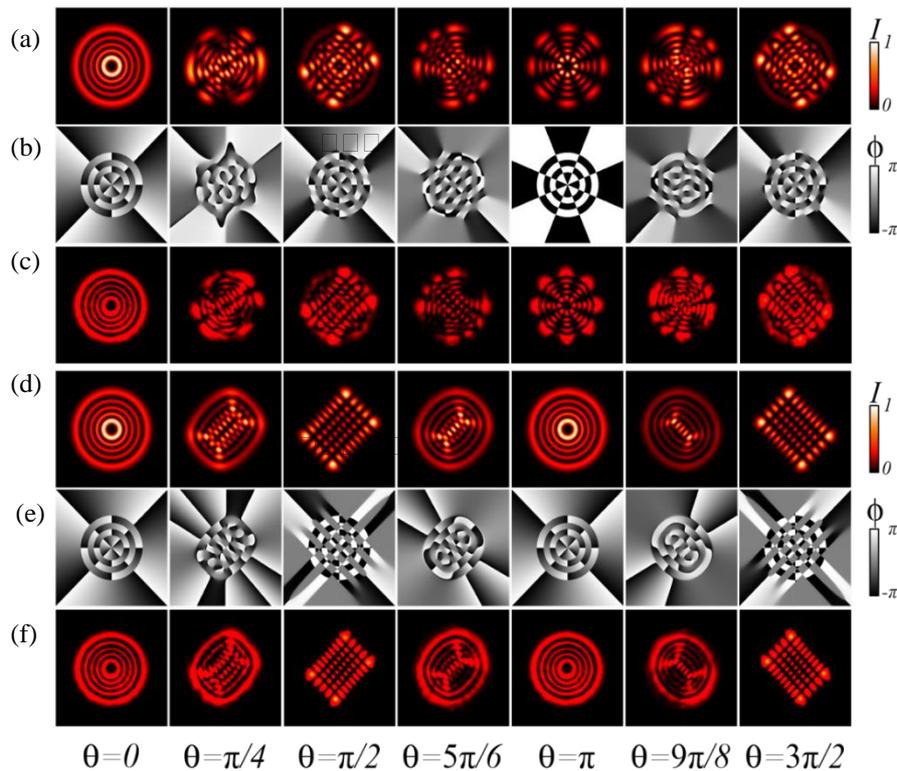


Рис. 2. Теоретические (a, d) и экспериментальные картины (c, f) интенсивности (a, c, d, f) и фазы (b, e) для двух параметров амплитуды $\theta, \varepsilon = 100$ и разные фазовые параметры

$$\theta \in (0, 3\pi/2) \text{ для возмущенной моды } LG_{n=4}^{l=4}$$

Мы видим, что изменения амплитудного параметра ε приводят к разделению sLG пучков на два больших семейства пучков. Первое семейство при $\varepsilon = 1$ представляет совокупность двух стандартных мод – LG моды и гибридной моды Эрмита-Лагерра-Гаусса (HLG) [7], второе семейства при $\varepsilon \gg 1$ характеризуется только гибридной HLG модой. Вариация фазового параметра приводит изменению амплитудной и фазовой структуры от вихревых LG мод до свободных от вихрей HG мод. В семействе sLG пучков с $\varepsilon = 1$ можно выделить состояние с фазовым параметром $\theta = \pi/2$, состоящее из суперпозиции LG и HG моды, и с $\theta = \pi$, представленное вырожденной LG модой, состоящей из двух LG мод с противоположными знаками топологических зарядов (ТС) вихрей. В семействе sLG пучков с $\varepsilon \gg 1$ также выделяются два состояния: 1) при $\theta = \pi/2$ формируется HG мода, 2) при $\theta = \pi$ формируется LG мода с противоположным знаком ТС. Гармонические возбуждения HG мод приводит к возникновению широкого спектра LG мод, с комплексными амплитудами вида

$$sLG_{n,l}(\mathbf{r}|\varepsilon, \theta) = \sum_{k=0}^{2n+l} f_k LG_{\min, 2n+l-2k}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

$$f_k = \delta_{n,k} + \alpha \frac{i^{n+k}}{2^{n+l} n!} e^{i(2n+l)\theta/2} (-1)^{\max} \min \times \times \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{n-k} \left(\cos \frac{\theta}{2} \right)^{n-l-k} P_k^{(n-k, n+l-k)}(\cos \theta), \quad (3)$$

$\min = \min(2n+l-k, k)$, $\max = \max(2n+l-k, k)$, $\delta_{k,n}$ – дельта функция Кронекера. В спектре LG мод (2) бросается в глаза перепутывание радиальных и азимутальных (ТС) чисел LG мод. Именно такое перепутывание квантовых чисел и приводит к быстрым осцилляциям ОУМ, изображенным на рис. 3.

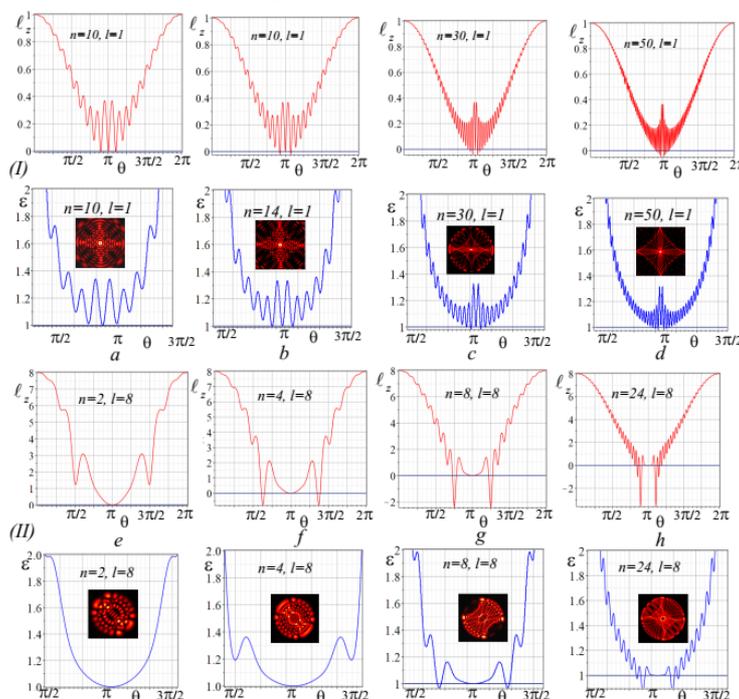


Рис. 3. Зависимость ОУМ от θ и нули ОУМ структурированного пучка ЛГ на параметрической плоскости (ε, θ) для двух случаев начального ТЗ $\ell = 1$ (I) и $\ell = 8$ (II) и некоторых значений радиального числа n . Выноски иллюстрируют модели интенсивности в $\theta = 3\pi/4$

Стоит только приравнять нулю начальное радиальное число sLG мод $n=0$ в (2), как быстрые осцилляции исчезают. Заметим, что sLG пучок содержит $N=2n+l$ мод с ТЗ в интервале от $TC=2n+l$ до $TC=-(2n+l)$. Например, sLG пучок с $n=8, l=8$ содержит 24 LG моды с различными знаками ТС.

До тех пор, пока ОУМ, как функция фазового параметра θ , не изменяет знак ОУМ, общий ТС структурированного пучка остается численно равным максимальному значению ОУМ при нулевом фазовом параметре $q=0$. Однако ТС одновременно с ОУМ меняет знак, но его абсолютная величина $|TC|=const$ во всем интервале фазовых параметров. Таким образом, модуль ТС является топологическим инвариантом гармонического возбуждения структурированного LG пучка.

Не менее интересными и важными являются астигматические преобразования sLG пучка в двойном фокусе цилиндрической линзы. Пример таких преобразований показан на рис. 4. Так, состояние $sLG_4^4(\varepsilon=1, \theta=\pi)$ (вырожденная LG мода) моды на рис. 4а преобразуется в две скрещенных HG моды на рис. 4б. Структура sLG пучка кардинально изменяется. Однако состояния $sLG_4^4(\varepsilon=1, \theta=\pi/2)$ на рисунок 4 с, d и состояния $sLG_4^4(\varepsilon=1, \theta=3\pi/2)$ остаются инвариантными при астигматических преобразованиях с точностью до углового поворота. Это происходит потому, что эти состояния состоят из суперпозиции двух мод типа LG+HG.

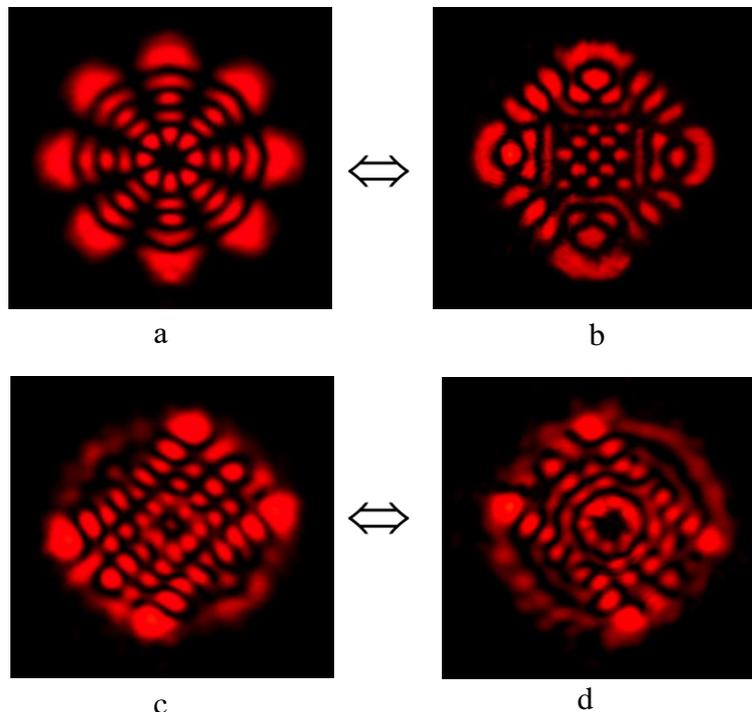


Рис. 4. Астигматическое преобразование sLG пучка с $\varepsilon=1$ для (a, b) $\theta=\pi$ и (c, d) $\theta=\pi/2$

Астигматическая линза осуществляет преобразование LG моды в HG моду, а HG моды в LG моду, так что распределение интенсивности просто поворачивается на $\pi/2$.

Аналогично, состояние $sLG_4^4(\varepsilon \gg 1, \theta = \pi)$ также остается инвариантным относительно астигматического преобразования с точностью до изменения знака ТС оптических вихрей.

Результаты и заключение

Рассмотрено возбуждение HG мод в структурированных LG пучках таким образом, что амплитудный параметр ε меняет амплитуды массива HG мод, а фазовый параметр θ вносит кратную начальную фазу в каждую HG моду. Теоретически и экспериментально обнаружено, что в общем случае sLG пучок при кратных гармонических возбуждениях HG мод является суммой двух сингулярных пучков – стандартного LG пучка и гибридного HLG пучка. При больших значениях амплитудного параметра структурированный LG пучок превращается в гибридный HLG пучок, ось которого повернута на угол $\pi/4$. Вариация фазового параметра θ вызывает быстрые осцилляции ОУМ при отличном от нуля радиальном числе n , которые сглаживаются при $n=0$ или при больших значениях амплитудного параметра ε . Быстрые осцилляции ОУМ связаны с перепутыванием радиальных n и азимутальных чисел в sLG пучке. Такое перепутывание не изменяет свойств собственных LG мод, но радикально изменяет свойства sLG пучка.

Литература

- [1] Forbes A., de Oliveira M., Dennis M. R. Structured light //Nature Photonics. – 2021. – V. 15. – Is. 4. – P. 253-262.
- [2] Nye J.F. et. al. Natural focusing and fine structure of light: caustics and wave dislocations // Institute of Physics Publishing. 1999. P. 327.
- [3] Basistiy I. V., Soskin M. S., Vasetsov M. V. Optical wavefront dislocations and their properties //Optics Communications. – 1995. – V. 119. – Is. 5-6. – P. 604-612.
- [4] Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams: optical and quantum aspects //Optics Communications. – 1996. – V. 125. – Is. 4-6. – P. 302-323.
- [5] Volyar A. et al. Fine structure of perturbed Laguerre–Gaussian beams: Hermite–Gaussian mode spectra and topological charge //Applied Optics. – 2020. – V. 59. – Is. 25. – P. 7680-7687.
- [6] Volyar A. et al. Control of the orbital angular momentum via radial numbers of structured Laguerre–Gaussian beams //Optics Letters. – 2022. – V. 47. – Is. 10. – P. 2402-2405.
- [7] Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. Физматлит. 2010.

УДК 535.411.854

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИЗ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАММЫ НА ОСНОВЕ СУБПИКСЕЛЬНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЕННЫХ ФУНКЦИЙ

**Владимир Иванович Гужов, Сергей Петрович Ильиных, Константин Владимирович Захаров,
Ольга Юрьевна Майер**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация

Предмет исследования - методы восстановления изображений из голограмм. В работе представлен новый алгоритм восстановления изображений из голограмм, основанный на сдвигах голограммы на величину меньшую размера апертуры элементов матричного фотоприемника. **Метод** основан на использовании уравнения дискретизации, полученном с помощью обобщенных функций. Проведено математическое моделирование процесса восстановления высокоразрешающего изображения из голограмм, полученных с низким разрешением. **Практическая значимость** предложенного метода заключается в возможности использования серии цифровых голограмм, получаемых с помощью матрицы фотоприемников с низким разрешением для восстановления из них высокоразрешающего изображения

Ключевые слова

Сверхразрешение, субпиксельный сдвиг, цифровая голография, преобразование Фурье, синтезированная апертура, дискретизация, обобщенные функции

A NEW METHOD OF DIGITAL HOLOGRAM RECONSTRUCTION BASED ON SUBPIXEL SAMPLING USING GENERALIZED FUNCTIONS

Vladimir I. Guzhov, Sergey P. Ilinykh, Konstantin V. Zaharov, Olga Y. Mayer
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract

The subject of research is methods of reconstruction of images from holograms. We report a new algorithm of reconstruction of images from holograms based on shifts of a hologram by a value smaller than the aperture size of elements of the matrix photodetector. **The method** is based on the use of the discretization equation derived from the generalized functions. Mathematical modeling of the process of restoration of a high-resolution image from holograms obtained with a low resolution has been performed. **The practical significance** of the proposed method consists in the possibility of using a series of digital holograms obtained with a low-resolution photodetector matrix to restore a high-resolution image from them

Keywords

Superresolution, subpixel shift, digital holography, Fourier transform, synthesized aperture, sampling, generalized functions

Введение

Методы цифровой голографии широко используются в различных областях науки и техники. При этом используются оптические схемы с небольшими углами между интерферирующими пучками. При малых углах интерференции запись и восстановление изображения возможны только для объектов с формой поверхности близкой к плоской. Это делает актуальной разработку эффективных методов повышения пространственного разрешения. Для этой цели используются методы восстановления изображения из цифровой голограммы, основанные на пространственных сдвигах голограммы на величину меньшую размера апертуры и синтеза новой голограммы из полученного набора

низкоразрешающих голограмм [1]. Таким методам присущи фазовые ошибки, обусловленные влиянием шума. В данной работе представлен новый метод восстановления изображений из голограмм, основанный на уравнении дискретизации, полученный с помощью аппарата обобщенных функций.

Дискретизация голограммы с помощью набора апертур

Реальная дискретизация осуществляется путем измерения регистрируемого сигнала с помощью набора датчиков с некоторой конечной апертурой. Числовые значения отсчетов изображения получают путем пространственного интегрирования по площади апертуры. В случае усреднения значений по плоскости единичной апертуры дискретизацию удобно описывать с помощью аппарата обобщенных функций. Получено аналитическое выражение для спектра ограниченного аналогового сигнала при дискретизации с помощью набора апертур [2]. Показано, что, в отличие от идеальной дискретизации, спектр регистрируемого аналогового сигнала содержит множитель - Фурье-образ используемой апертуры. Приводится вид апертурной функции для апертуры прямоугольной формы. Для случая, когда вид апертуры неизвестен, показан способ получения апертурной функции на основе сравнения спектров тестовых объектов.

Экспериментальное исследование алгоритма

В ходе экспериментального исследования алгоритма фиксировалась голограмма, полученная при угле между интерферирующими опорным и объектным пучками 10 градусов на фотопластинке. С помощью модифицированного оптического микроскопа голограмма была оцифрована. Для моделирования процедуры реальной дискретизации с конечной апертурой голограмма усреднялась плавающим окном размером 8x8. Это соответствует 8 сдвигам с единичными шагами по x и 8 сдвигам по y со сдвигом на одну точку. Затем объединяли 64 голограммы, размером 256x256 пикселей в одну с разрешением 2048x2048. Поскольку голограмма записывалась в области Фраунгофера, для восстановления действительного изображения использовалось преобразование Фурье. После поэлементного деления восстановленного изображения на спектр апертурной функции было получено высокоразрешающее изображение.

Заключение

При повышении пространственного разрешения появляется возможность проводить исследования методами цифровой голографии объемных диффузных объектов с качеством аналоговой. Найдено аналитическое выражение для спектра функции при реальной дискретизации. В отличие от идеальной дискретизации спектр функции дополняется множителем, вид которого зависит только от формы и геометрических характеристик апертуры. Для случая, когда вид апертуры неизвестен, показан способ получения апертурной функции на основе сравнения спектров тестовых объектов. Метод не требует решения систем уравнений большой размерности.

Литература

- [1] Fournier C. et al. Pixel super-resolution in digital holography by regularized reconstruction //Applied optics. – 2017. – V. 56. – Is. 1. – P. 69-77.
[2] Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E. Increasing the spatial resolution of signals in optical systems //Computer Optics. – 2022. – V. 46. – Is. 1. – P. 65-70.

УДК 535.44

НЕКОТОРЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СРЕД ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН (ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ, ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ, «МЕДЛЕННЫЙ СВЕТ», ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДА ЯДЕРНОЙ DD РЕАКЦИИ)

Александр Владиславович Крайский, Антон Александрович Крайский

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

Аннотация

Излагаются свойства резонансного отражения светового излучения от слоистой периодической структуры. Основное внимание уделяется окнам прозрачности – областям спектра вблизи запрещенной зоны, в которых внутри слоя может происходить значительное увеличение амплитуды поля. Кратко сообщается о проблемах «медленного света», т. е. замедлении групповой скорости светового импульса, спектр которого содержится внутри окна прозрачности. Кратко излагаются результаты применения этих представлений для объяснения значительного повышения выхода DD-реакций в твердотельных дейтерированных мишенях при облучении их низкоэнергетическими дейтронами

Ключевые слова

Фотонные кристаллы, край зоны, окна прозрачности, увеличение амплитуды поля, медленный свет, увеличение выхода DD реакций

SOME MANIFESTATIONS OF THE RESONANT PROPERTIES OF LAYERED PERIODIC MEDIA UNDER WAVE PROPAGATION (FORMATION OF A BAND GAP; TRANSPARENCY WINDOWS; "SLOW LIGHT"; INCREASE IN THE YIELD OF A NUCLEAR DD REACTION)

Aleksandr V. Kraiski, Anton A. Kraiski

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The properties of resonant reflection of light radiation from a layered periodic structure are described. The main attention is paid to transparency windows, i.e., regions of the spectrum near the band gap, in which a significant increase in the field amplitude can occur inside the layer. The effect has many applications. Briefly is reported on the problems of "slow light", i.e. deceleration of the group velocity of a light pulse whose spectrum is contained within the transparency window. The results of applying these concepts to explain the significant increase in the yield of DD reactions in deuterated targets upon irradiation with low-energy deuterons are presented

Keywords

Photonic crystals, zone edge, transparency windows, increase in field amplitude, slow light, increase in the yield of DD reactions

Введение

В 1989 г. появилась публикация [1], где были приведены результаты расчетов нового резонансного явления – увеличения интенсивности падающей световой волны внутри многослойной среды с периодически чередующимися слоями. Это происходит на отдельных участках спектра, в центре каждого из них излучение проходит сквозь слой без потерь. Такие участки будем называть окнами прозрачности. Длина волны этого излучения находится вблизи края запрещенной зоны вне ее. Излучение с длиной волны внутри этой зоны не может пройти сквозь слой вследствие другого типа резонансных спектральных свойств периодических структур. Они известны в природе давно: расцветка бабочек, перьев птиц, некоторых минералов. Искусственные материалы с такими спектральными

свойствами стали делать и изучать недавно, начиная с работ середины XIX века: Э. Беккерель, Ценкер, Рэлей, Винер, Липпман, Брэгги. На этих свойствах основывается голография Денисюка. В середине прошлого века на основе таких сред стали изготавливать интерференционные диэлектрические зеркала, игравшие ключевую роль в развитии лазеров. Изучались также резонансные свойства этого типа для волн другой природы в периодических средах и нашли свои применения для анализа сред (рентгеноструктурный анализ кристаллов), исследования движения свободных электронов в твердых телах привели к представлениям о зонной структуре твердых тел.

О резонансных свойствах волн в слоистой одномерной структуре

Для описания спектров пропускания и отражения при достаточно малом отражении (и малой величине амплитуды модуляции переменной части показателя преломления n_1) можно получить аналитические выражения для отраженного поля [2]. Свойства спектра отражения достаточно хорошо известны. При больших значениях n_1 спектр начинает искажаться, в спектре пропускания формируется запрещенная зона, далее – окно прозрачности. Такая среда получила название фотонный кристалл. Окна прозрачности широко исследовались и экспериментально, и компьютерным моделированием распространения излучения в среде и аналитически (с помощью метода связанных волн [3], с помощью теории возмущений [4, 5]). Факт резонансного увеличения амплитуды светового поля стимулировал многочисленные исследования оптических свойств таких сред.

В литературе широко рассматривается использование фотонных кристаллов для понижения уровня мощности излучения в нелинейных эффектах: для понижения порога ВКР, для повышения мощности вторичного излучения - люминесценции и комбинационного рассеяния света, для создания низкопороговых лазеров, для использования в качестве сенсоров, параметрических преобразователей частоты, для увеличения преобразования света в солнечных батареях, генераторов гармоник, для задержки коротких световых импульсов и во многих других применениях (см. обзор [5]). Значительная задержка (носит название «медленный свет») весьма проблематична, поскольку при возникновении основывалась на формальном свойстве обращения производной дисперсионной кривой в 0 на краю запрещенной зоны. Однако для линейных сред в силу узости окна прозрачности это может относиться лишь к импульсам с узким спектром, следовательно, достаточно длинным по времени. Таким образом, задержка без значительного искажения формы возможна лишь в пределах длительности импульса [6].

Определение сечений D-D реакций при энергиях меньших 100 кэВ затруднено из-за их малости. В экспериментах на ускорителях применяются твердотельные мишени с имплантированным дейтерием. Тогда по сравнению с экстраполяцией из области высоких энергий выход D–D-реакции значительно увеличивается (до порядков величин). В качестве возможной причины этого в [7] было высказано предположение о возможности увеличения амплитуды волновой функции налетающих частиц внутри кристалла по сравнению с амплитудой в отсутствие кристалла. Это обосновывалось сходством уравнения Шредингера для волновой функции нерелятивистской частицы в одномерном периодическом потенциале и волнового уравнения для света в одномерной плоскостной среде и схожестью граничных условий. Тогда для частицы также должна быть запрещенная энергетическая зона и вблизи нее окна прозрачности, в которых должно наблюдаться увеличение амплитуды волновой функции, что позже было подтверждено расчетами [8].

Литература

- [1] Капаев В.В. Особенности распределения электромагнитного излучения в приповерхностном слое сульфида кадмия при комбинированном электронно-световом отжиге //Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – №. 11. – С. 2271–2278.
- [2] Крайский А.В., Постников В.А., Миронова, Т.В., Крайский А.А., Шевченко М.А., Казарян М.А. Голографические сенсоры компонентов водных растворов и биологических жидкостей //Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – №. 10-12. – С. 105.
- [3] Steel M.J., De Sterke C.M. Continuous-wave parametric amplification in Bragg gratings //JOSA B. – 1995. – V. 12. – Is. 12. – P. 2445-2452.
- [4] Крайский А.А., Крайский А.В. О свойствах окон прозрачности вблизи края запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2018. – Т. 45. – №. 2. – С. 37–46.
- [5] Крайский, А.А., Крайский, А.В., Казарян, М.А., Захарян, Р.А. О резонансном увеличении поля внутри фотонного кристалла в окнах прозрачности вблизи запрещенной зоны и некоторых его применениях //Фотоника. – 2018. – Т. 12. – №. 8. – С. 802–822.
- [6] Крайский, А.А., Крайский, А.В. О групповой скорости узкополосного импульса в пределах окна прозрачности возле запрещённой зоны одномерного фотонного кристалла //XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 529–531. – 664 с.
- [7] Крайский А.А., Крайский А.В. О возможном волновом механизме, приводящем к повышению выхода низкоэнергетических ядерных реакций в кристаллических структурах //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №. 4. – С. 20–23.
- [8] Крайский А.А. и др. О сильном увеличении амплитуды волновой функции массивной нерелятивистской частицы, падающей на кристалл (одномерное приближение) //Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, – 2022, – №. 5. – С. 84–93.

УДК 666.112

РОЛЬ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ДЛЯ ФОТОНИКИ И ГОЛОГРАФИИ В XXI ВЕКЕ

Николай Валентинович Никоноров

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Организация Объединенных Наций объявила 2022 год Международным Годом Стекла. Цель этого мероприятия - привлечение внимания международной общественности к развитию фундаментальных и прикладных наук в области стекла, а также вовлечению в научную и индустриальную среду молодых и талантливых специалистов. В связи с этим мероприятием настоящая обзорная лекция посвящена оптическим стеклам, которые решают задачи в оптике, фотонике и, в частности, голографии. В лекции показана роль оптического стекла в оптической науке и индустрии. Рассмотрена хронология развития оптических материалов, показаны прорывные технологии и сдерживающие факторы. Определены ключевые тренды развития оптики и фотоники XXI века. Эти тренды определяют развитие и прогресс стекольной науки и индустрии XXI века. В лекции подробно уделено внимание современному состоянию индустрии оптического стекла в России. Также представлены новые разработки оптических стекол в университете ИТМО. Отличительной особенностью разработок университета ИТМО является создание не только стекол, но и оптических элементов и устройств на их основе. Приведен пример разработки фото-термо-рефрактивного стекла и созданию на его основе широкой линейки голографических оптических элементов и устройств фотоники нового поколения. Отдельное внимание в лекции уделено подготовке кадров по стекольному направлению в университете ИТМО

Ключевые слова

Оптическое стекло, роль оптического стекла, тренды развития оптического стекла, фото-термо-рефрактивное стекло, голографические оптические элементы

ROLE OF OPTICAL GLASSES FOR PHOTONICS AND HOLOGRAPHY IN XXI CENTURY

Nikolay V. Nikonorov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

Attention of the international community to the development of fundamental and applied sciences in the field of glass, as well as to involve young and talented specialists in the scientific and industrial environment. In connection with this event, this review lecture is devoted to optical glasses that solve problems in optics, photonics, and, in particular, holography. The lecture shows a role of optical glass in optical science and industry. The chronology of the development of optical materials is considered, breakthrough technologies and limiting factors are shown. The key trends in the development of optics and photonics in the XXI century are determined. These trends determine the development and progress of glass science and industry in the XXI century. The lecture focuses on details of the current state of the optical glass industry in Russia. New developments of optical glasses at ITMO University are also presented. A distinctive feature of ITMO University developments is the synthesis of not only glasses, but also fabrication of optical elements and devices based on them. An example of the development of photo-thermo-refractive glass and the creation on its basis of a wide range of holographic optical elements and photonic devices of a new generation is given. Special attention in the lecture is given to the students training in the field of glass science at ITMO University

Keywords

Optical glass, role of optical glass, optical glass development trends, photo-thermo-refractive glass, holographic optical elements

Стекло поддерживает многие жизненно важные технологии, способствует устойчивому и экологическому миру, обогащает нашу жизнь, но часто остается незамеченным. Стекло, несмотря на то что оно было известно 3–5 тысяч лет до нашей эры – это инновационный продукт, который постоянно развивается вместе с технологиями. Стекольная индустрия вносит значительный вклад в мировую экономику как один из ключевых поставщиков ресурсов для многих отраслей, включая строительство,

автомобилестроение, фармацевтику, косметическую, туристическую, мебельную, оборонную промышленность. Благодаря беспрецедентной универсальности и техническим возможностям стекло во многих его проявлениях способствовало бесчисленным культурным и научным достижениям. Ученые и промышленники постоянно стремятся расширить границы применения стекольной продукции, полагая, что XXI век станет «стеклянным веком» устойчивого мира. Поэтому 2022 год объявлен Организацией Объединенных Наций Международным Годом Стекла. Впервые такой чести удостоивается не человек, не наука, не язык, не изобретение, а материал – СТЕКЛО! Цель этого мероприятия – привлечение внимания международной общественности к развитию фундаментальных и прикладных наук в области стекла, к углублению и расширению методик исследования, вовлечению в научную и индустриальную среду молодых и талантливых специалистов. Проведение Года Стекла позволит привлечь больше внимания человечества к технологическому, научному, экономическому, эстетическому и историческому значениям стекла. В настоящей обзорной лекции речь пойдет не просто о стекле, а о специальных стеклах – оптических стеклах, которые решают задачи в оптике, фотонике и, в частности, голографии.

По сравнению с общим объемом выпуска стекольной продукции, включающей тарное, листовое, сортовое, светотехническое, медицинское, химико-лабораторное, стекловолокно, направление оптических стекол занимает небольшую часть ~1-2 %. Но это крайне важный и востребованный сектор на рынке фотоники. Так, стоимость килограмма оптического стекла может превышать стоимость килограмма тарного, листового или сортового стекла в сотни раз. А ассортимент оптических стекол в ~ 20 раз превышает ассортимент неоптических стекол. Также оптические стекла охватывают чрезвычайно широкое разнообразие составов и легирующих добавок. Так, если для тарного, листового, сортового, светотехнического, медицинского, химико-лабораторного стекла используются только силикатные стеклообразующие составы, то для оптических стекол используются не только силикатные, но также и фосфатные, боратные, германатные, алюминатные, теллуридные, ванадатные и т. д. стеклообразующие составы. Оптические стекла обладают чрезвычайно разнообразным функционалом, который позволяет проводить разнообразные операции со световыми потоками: передавать световые потоки, выделять заданные спектральные диапазоны, генерировать, усиливать и модулировать свет, преобразовывать длину волны света, вращать плоскость поляризации, записывать и хранить информацию и т. д. Для этих задач стекла легируются широким спектром добавок: ионами редких земель, переходных и благородных металлов, молекулярными кластерами, квантовыми точками, наночастицами и нанокристаллами (диэлектрическими и полупроводниковыми).

В лекции показана роль оптического стекла в нашей жизни. Так, например, основоположник отечественной оптической науки и промышленности, основатель Государственного оптического института, академик Рождественский Д.С. в начале XX века говорил, что «...Без оптического стекла нет ни познания природы, ни власти над ней...». Т. е. на стадии создания оптической науки и индустрии он отводил особую роль оптическим материалам и, прежде всего, оптическим стеклам. Во втором десятилетии XXI века, в соответствии с новыми вызовами в оптике и фотонике, эту формулировку можно расширить на другие отрасли: «Сегодня оптические материалы определяют развитие и прогресс не только в оптике и фотонике, но также в области телекоммуникационных, информационных и компьютерных технологий, биоинженерии, медицины, освещении, микроэлектроники, энергетики будущего».

Сегодня оптические технологии вытесняют традиционные технологии. Так, например, в области хранения данных (особенно больших), объемом несколько сотен Терабайт, магнитные носители начинают вытесняться оптическими носителями

(оптическими дисками), которые помимо сохранения большого объема информации более долговечны и не подвержены внешним электромагнитным воздействиям, т.е. они могут применяться для архивной памяти. Сенсорные устройства разного назначения, которые раньше были основаны на электрических принципах, сегодня начинают вытесняться более чувствительными сенсорами, построенными на оптических принципах с использованием электромагнитных волн или фотонов. Если раньше использовались катодолуминесцентные трубки для телевизоров, кинескопов дисплеев, то сегодня они полностью вытеснены оптическими плоскими дисплеями. Механическая обработка (прежде всего резка, сварка) материалов заменяется на более точную лазерную обработку, использующую непрерывное или импульсное (фемтосекундное) лазерное излучение. Медный кабель, который использовался для проводной связи, заменяется на оптическое волокно, которое по объему и скорости передачи информации, а также по помехозащищенности, намного превосходит медный провод. Такое вытеснение традиционных технологий оптическими невозможно было бы осуществить без разработки оптических материалов, и в первую очередь, стекол. Т.е. именно оптические материалы определяют конкурентные преимущества оптических технологий перед классическими.

В работе рассмотрена хронология развития оптических материалов, показаны прорывные технологии и сдерживающие факторы. Определены ключевые тренды развития оптики и фотоники XXI века. Эти тренды позволяют ответить на вопрос: «А какие стекла будут в XXI веке, т. е. какие стекла будут обеспечивать эти тренды?». Можно выделить несколько ключевых направлений, а именно:

- 1) разработка стекол и стеклокерамик, способствующих миниатюризации оптических и фотонных элементов, приборов и систем с целью уменьшения их массогабаритных характеристик, энергопотребления и управляющих воздействий;
- 2) расширение функционального диапазона работы стекол и стеклокерамик. На смену традиционным оптическим материалам должны прийти наноматериалы, обладающие уникальными квантово-размерными характеристиками, и метаматериалы, обладающие физическими свойствами, которые не встречаются в природе (отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью). Должны быть созданы не только лабораторные образцы этих материалов, а разработаны их промышленные технологии;
- 3) разработка материалов, позволяющих проводить гибридную и монолитную интеграцию оптических и фотонных элементов, приборов и систем на единой подложке;
- 4) разработка материалов со сверхбыстрым (фс) переключением для создания полностью оптических устройств управления сигналом;
- 5) разработка материалов с низким уровнем энергии управляющих сигналов (фДж);
- 6) разработка сверхчистых стекол с рекордно низкими потерями и специальным ходом дисперсии для волоконных линий связи и фотолитографии;
- 7) разработка стекол для микро-структурированных и фотонно-кристаллических оптических волокон, в том числе активированных для волоконных лазеров и сенсоров;
- 8) разработка стекол и стеклокерамик, в том числе активированных, для получения крупногабаритных оптических элементов высокого оптического качества (лазерный термоядерный синтез, фотолитография, астрономическая оптика);
- 9) разработка гибридных материалов типа «стекло-полимер» для сверхлегких оптических элементов (авионика, космос);
- 10) разработка сверхпрочных стекол и стеклокерамик (авионика, глубоководные и космические аппараты);
- 11) разработка сверхтонких крупногабаритных стеклянных панелей (дисплеи, солнечные батареи, гибкая и рулонная оптика);

12) разработка стекол с низкими температурами формования и моллирования и особым ходом дисперсии (микрооптика);

13) разработка стекол и стеклокерамик, работающих в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне, а также в ТГц диапазоне.

В лекции подробно уделено внимание современному состоянию индустрии оптического стекла в России. Также представлены новые разработки оптических стекол в университете ИТМО. Так, например, в университете ИТМО разработана широкая линейка стекол нового поколения:

- лазерные высококонцентрированные стекла и стеклокерамики, активированные редкоземельными ионами, для мини- и микролазеров ближнего ИК диапазона;
- стекла с нанокристаллами рубина для лазеров красного диапазона спектра, используемых в медицине и косметологии;
- магнитооптические стекла, реализующих эффект Фарадея, для оптических изоляторов и волоконных датчиков магнитных и электрических полей;
- нелинейно-оптические стекла с нанокристаллами галогенидов и халькогенидов металлов для фильтров-лимитеров, защищающих органы зрения и фотоприемники от действия импульсного лазерного излучения;
- люминесцентные стекла, легированные ионами редких земель и переходных металлов, в том числе стекла с нанокристаллами перовскитов, для люминофоров и маркеров;
- ионообменные и сверхпрочные стекла для планарных волноводов и градиентных оптических элементов, а также сверхтонких дисплеев и защитных стекол солнечных батарей;
- фото-структурируемые стекла для «лабораторий на чипе» и микросистем полного анализа;
- фотохромные и мультихромные стекла для архивной памяти, оптической записи монохромного и цветного изображения;
- фото-термо-рефрактивные стекла для записи объемных фазовых голограмм.

Отличительной особенностью разработок университета ИТМО является создание не только стекол, но и оптических элементов и устройств на их основе, т.к. Заказчику надо продемонстрировать не сам оптический материал (стекло) и его характеристики, а как этот материал работает в конкретном устройстве, и какие конкурентные преимущества, по сравнению с известными аналогами, он даст Заказчику. Поэтому выходной продукцией университета ИТМО являются не только материалы, но и элементы и устройства на их основе. Так, например, на основе разработанного в университете фото-термо-рефрактивного стекла создана линейка голографических оптических элементов и устройств фотоники нового поколения:

- сверхузкополосные фильтры для повышения спектральной яркости излучения и температурной стабилизации длины волны лазеров, в том числе полупроводниковых;
- объемные брэгговские решетки для одночастотных лазерных источников, применяемых в квантовых коммуникациях;
- голографические призмы для калибровки углоизмерительных и углозадающих приборов навигации;
- сумматоры мощных лазерных пучков;
- chirпированные решетки для компрессии световых импульсов и получения сверхкоротких лазерных импульсов фемтосекундной длительности;
- метки для голографических коллимационных лазерных прицелов;
- дисплеи и очки дополненной реальности и т. д.

Разработанные в университете ИТМО новые стекла, элементы и устройства на их основе позволяют успешно конкурировать на мировом рынке фотоники.

УДК 535.421

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Алексей Леонидович Толстик

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

В работе проанализированы возможности диагностики конденсированных сред на основе метода пространственно-модуляционной спектроскопии, основанного на анализе кинетики процессов записи и релаксации динамических решеток. Показана эффективность выделения различных механизмов нелинейности в условиях нелинейной записи динамических голограмм, а также за счет изменения длины волны записывающего излучения, периода динамических решеток и использования дополнительной решетки (гомодина). Разработанные методики апробированы на примерах растворов красителей, чистых и легированных полупроводников, фоторефрактивных и активированных материалов. Проведенные измерения позволяют определить времена заселения возбужденных и ловушечных уровней, время жизни носителей заряда, термооптический коэффициент, коэффициент температуропроводности и др

Ключевые слова

Голография, динамические решетки, оптические нелинейности, термооптика

DYNAMIC GRATING METHOD FOR DIAGNOSTICS OF FUNCTIONAL MATERIALS

Alexei L. Tolstik

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

In this paper the possibilities for diagnostics of condensed media using the method of spatial modulation spectroscopy based on analysis of kinetics of the dynamic grating recording and relaxation processes have been considered. The separation efficiency of various nonlinearity mechanisms in conditions of nonlinear recording of dynamic holograms as well as due to changes in the wavelength of recording radiation or the period of dynamic gratings and due to the use of an additional grating (homodyne) has been shown. The developed methods have been tested by using dye solutions, pure and doped semiconductors, photorefractive and activated media. The measurements described enable one to determine the population times of excited and trapped levels, lifetime of charge carriers, thermo-optical coefficient, temperature-conductivity coefficient, etc

Keywords

Holography, dynamic gratings, optical nonlinearities, thermo-optics

Введение

Существенным достоинством метода динамических решеток является возможность бесконтактной диагностики разнообразных материалов на основе анализа кинетики записи и релаксации формируемых в этих материалах динамических решеток. При этом появляется возможность выделения различных механизмов нелинейности за счет изменения длины волны записывающего излучения, периода решетки, длительности импульсов и интенсивности лазерного излучения. Все это позволяет реализовать измерения в широком спектральном и временном диапазонах. В настоящей работе на примерах растворов красителей, чистых и легированных полупроводников, фоторефрактивных кристаллов и активированных лазерных сред продемонстрирована эффективность выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, кинетических и термооптических характеристик материалов при записи тонких и объемных динамических голограмм.

Используемые методы и подходы

Для формирования динамических решеток в конденсированных средах были использованы схемы записи тонких и объемных, пропускающих и отражательных голограмм импульсным лазерным излучением. Восстановление записанных динамических решеток проводилось непрерывным лазерным излучением или отдельными лазерными импульсами с контролируемым временем прихода [1, 2]. Для измерения нелинейностей пятого и более высоких порядков использовались схемы нелинейной записи динамических голограмм, позволяющие выделить различные порядки нелинейности за счет изменения направления распространения считывающей волны в условиях брегговской дифракции [2, 3]. Анализ кинетики дифракции применен для измерения времени жизни метастабильного состояния активированных лазерных сред [4]. Для разделения различных механизмов нелинейности в условиях их одновременного проявления была использована интерференция дифрагированного сигнала с сигналом, получаемым при дифракции считывающей волны на дополнительной решетке (гомодине) при контролируемой фазовой задержке.

Результаты и заключение

Продемонстрированы возможности выделения различных механизмов нелинейности, участвующих в формировании динамических решеток, и измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик функциональных материалов, используемых в голографии, оптоэлектронике, фотонике. На примере объемных и тонкопленочных полупроводников выделены вклады электронной и тепловой компонент и определены времена рекомбинации свободных носителей заряда, вклад тепловой нелинейности и коэффициент температуропроводности. Показана возможность оценки толщины оксидной пленки на поверхности полупроводника на основе анализа акустической компоненты в дифрагированном сигнале. Применение метода динамических решеток к анализу лазерных сред с высокой концентрацией активных центров позволило уточнить значение времени жизни метастабильного состояния по сравнению с классическим методом на основе кинетики люминесценции. Для фоторефрактивных кристаллов определены условия формирования коротко- и долгоживущих дифракционных решеток, кинетика релаксации которых позволила измерить времена жизни ловушечных уровней, участвующих в процессе формирования динамических голограмм. Такая методика предложена для измерения термооптического коэффициента второго порядка поглощающих жидкостей (d^2n/dT^2), учитывающего зависимость теплоёмкости и плотности среды от температуры.

Литература

- [1] Dadenkov I.G. et al. Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – V. 128. – P. 1401–1406.
- [2] Rubanov A.S. et al. Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media // *Optics Communications*. – 2000. – V. 181. – P. 183–190.
- [3] Agishev I.N., Tolstik A.L. Highly effective six-wave mixing in linearly absorbing organic liquids // *Technical Physics Letters*. – 2009. – V. 35. – P. 746–749.
- [4] Ivakin E.V. et al. Laser ceramics Tm:Lu₂O₃. Thermal, thermo-optical, and spectroscopic properties // *Optical Materials*. – 2013. – V. 35. – P. 499–503.

УДК 535.417

РЕГИСТРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ОБЪЁМНЫХ ГОЛОГРАММ

Сергей Геннадьевич Каленков

Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Аннотация

В работе рассмотрен метод регистрации и реконструкции цифровых объемных голограмм, записанных с фазово-модулированным опорным пучком, который создается подвижным зеркалом интерферометра. В процессе перемещения зеркала в каждом пикселе матрицы записывается интерферограмма: интенсивность интерференционного поля, образованного объектным и опорными полями, как функция величины перемещения подвижного зеркала. Фурье преобразование интерферограммы в каждом пикселе матрицы регистрации дает цифровую голограмму. В случае, когда голограмма записывается в свете когерентного источника, набор интерферограмм, записанных при каждом смещении зеркала, можно рассматривать как цифровые «слои» в объемных голограммах Денисюка. Показано, что при оптимальной связи между шагом зеркала и длиной волны можно при реконструкции голограммы устранить как фон, так и сопряженное изображение

Ключевые слова

Цифровая голографическая микроскопия, амплитудно-фазовое изображение, интерферограмма, сканирующий интерферометр

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект #22-29-01070

REGISTRATION OF DIGITAL VOLUMETRIC HOLOGRAMS

Sergei G. Kalenkov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract

The paper considers a method for recording and reconstructing digital volumetric holograms recorded with a phase-modulated reference beam, which is created by a movable interferometer mirror. In the process of moving the mirror in each pixel of the matrix, an interferogram is recorded - the intensity of the interference field formed by the object and reference fields, as a function of the amount of movement of the movable mirror. The Fourier transform of the interferogram in each pixel of the registration matrix gives a digital hologram. In the case when the hologram is recorded in the light of a coherent source, the set of holograms recorded at each mirror displacement can be considered as digital "layers" in Denisjuk's volume holograms. It is shown that with an optimal relationship between the mirror pitch and the wavelength, it is possible to eliminate both the background and the conjugate image during the reconstruction of the hologram

Keywords

Digital holographic microscopy, amplitude- and phase imaging, interferogram, scanning interferometer

Acknowledgements

Financial support from Russian Science Foundation under the grant #22-29-01070 is gratefully acknowledged

Введение

В серии наших работ [1-4] был предложен метод регистрации цифровых гиперспектральных голограмм. Особенность данного метода состоит в том, что для записи гиперспектральных голограмм используется источник некогерентного (белого) света. Сама процедура записи состоит в том, что в оптическую схему интерферометра включено подвижное зеркало для создания серии фазовое - модулированных опорных пучков.

Отдельный интерес представляет регистрация серии интерферограмм в свете когерентного источника: continuous phase-shifting holography [5]. В этом случае, как мы показали, набор интерферограмм, можно рассматривать как своеобразные цифровые

«слои» в объемных голограммах Денисюка [6]. Объемные голограммы, как известно, позволяют разделить в пространстве действительное и мнимое (сопряженное) изображение объекта. Мы показали, что предложенный метод записи объемных цифровых голограмм позволяет устранить шум, возникающий из-за наложения друг на друга действительного и сопряженного изображения. Сама по себе возможность регистрации цифровых объемных голограмм представляет, конечно, самостоятельную ценность и в других задачах, где есть необходимость регистрации не только плоских объектов, но и протяженных сцен. Мы также исследовали различные алгоритмы реконструкции объемных сцен, записанных с помощью сканирующего интерферометра.

Используемые методы и подходы

Оптическая схема регистрации цифровых объемных голограмм включает источник когерентного излучения и сканирующий интерферометр (рис. 1). В каждом пикселе матрицы регистрации записывается интерферограмма – зависимость интенсивности интерференционного поля как функция смещения сканирующего зеркала. Фурье преобразование интерферограммы в каждом пикселе матрицы на спектральной частоте источника излучения дает комплексную амплитуду объектного поля, т.е. цифровую голограмму (рис. 2). В этом случае набор цифровых интерферограмм, можно рассматривать как цифровые «слои» в объемных голограммах Денисюка.

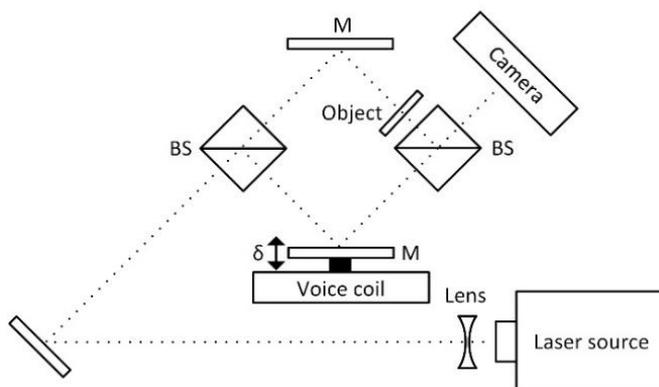


Рис. 1. Оптическая схема записи цифровых объемных голограмм методом непрерывного сканирования

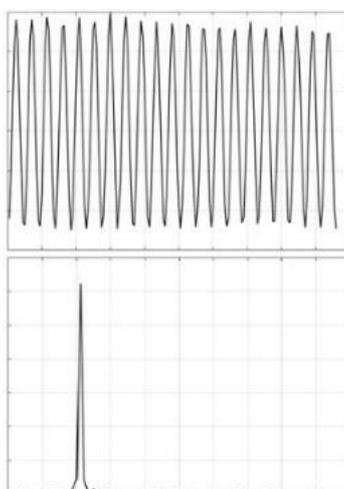


Рис. 2. Интерферограмма, зарегистрированная в процессе смещения зеркала, и ее спектр

Результаты и заключение

Принципы и идеи аналоговой голографии во встречных пучках, заложенные в пионерских работах Ю.Н. Денисюка применимы с успехом и в цифровой голографии в оптических схемах со сканирующим интерферометром. При этом роль зеркальных слоев почернения в фотослое играет набор цифровых голограмм («цифровые» слои), полученные при смещении сканирующего зеркала. Мы показали, что при определенной связи между числом цифровых слоев и расстоянием между ними, определяемым смещением сканирующего зеркала, реконструированное изображение не содержит шум, связанный с наличием фона и сопряженного изображения [7].

Литература

- [1] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Spectrally-spatial Fourier-holography //Optics express. – 2013. – V. 21. – Is. 21. – P. 24985-24990.
- [2] Kalenkov G.S., Kalenkov S.G., Shtan'ko A.E. Hyperspectral holographic Fourier-microscopy //Quantum Electronics. – 2015. – V. 45. – Is. 4. – P. 333.
- [3] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Hyperspectral holography: an alternative application of the Fourier transform spectrometer //JOSA B. – 2017. – V. 34. – Is. 5. – P. B49-B55.
- [4] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Self-reference hyperspectral holographic microscopy //JOSA A. – 2019. – V. 36. – Is. 2. – P. A34-A38.
- [5] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Continuous phase-shifting holography //JOSA A. – 2020. – V. 37. – Is. 1. – P. 39-44.
- [6] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S., Shtanko A.E. Digital hyperspectral holography and Denisyuk holograms. Principles and analogy //Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. – Optica Publishing Group, 2019. – P. Th3A. 29.
- [7] Kalenkov S.G., Kalenkov G.S. Registration of digital holograms by means of resonant phase-shifting //JOSA A. – 2021. – V. 38. – Is. 2. – P. A7-A10.

УДК 535.41

МГНОВЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Владимир Петрович Рябухо

Саратовский государственный университет им. Чернышевского Н.Г., г. Саратов, Россия

Аннотация

С использованием численного моделирования исследованы пространственные амплитудно-фазовые флуктуации волнового поля, возникающие в результате мгновенной интерференции волн, излучаемых элементарными источниками протяженного частотно широкополосного источника. Показана зависимость параметров флуктуаций – их поперечных и продольных длин, от ширины частотного и ширины углового спектров поля, определяющих соответственно длины поперечной и продольной когерентности волнового поля. Проанализирована пространственно-временная динамика флуктуаций волнового поля и их декорреляционные изменения в зависимости от ширины частотного и углового спектров поля

Ключевые слова

Волновые флуктуации, когерентность, продольная когерентность, временная когерентность, угловой спектр, частотный спектр, дифракция, интерференция, мгновенные спекл-структуры

INSTANT FLUCTUATIONS AND SPATIAL COHERENCE OF THE WAVE FIELD OF EXTENDED LIGHT SOURCE

Vladimir P. Ryabukho

Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russia

Abstract

Using numerical simulation, spatial amplitude-phase fluctuations of the wave field resulting from the instantaneous interference of waves emitted by elementary sources of an extended frequency-broadband source are studied. The fluctuation parameters, their transverse and longitudinal lengths, are shown to depend on the width of the frequency and angular spectra of the field, which determine the lengths of the transverse and longitudinal coherence of the wave field, respectively. The spatiotemporal dynamics of wave field fluctuations and their decorrelation changes depending on the width of the frequency and angular spectra of the field are analyzed

Keywords

Wave fluctuations, coherence, longitudinal coherence, temporal coherence, angular spectrum, frequency spectrum, diffraction, interference, instantaneous speckle structures

Введение

Немонохроматические волновые поля пространственно некогерентных источников света частично когерентны во времени и в пространстве. Такие поля имеют ограниченные времена и длины корреляции порождаемых в пространстве возмущений [1]. Эти корреляционные параметры волнового поля зависят как от ширины частотного спектра, так и от ширины углового спектра поля в области наблюдения. Формально время и длины корреляции волнового поля определяются как ширина соответствующей функции корреляции поля – временной, пространственной поперечной (двумерной) или пространственной продольной функции корреляции. Функции корреляции возмущений могут быть определены в явном виде с использованием теоремы Винера-Хинчина теории случайных процессов и ее обобщения на случайные поля – пространственные случайные процессы, при известном частотном и пространственно частотном спектрах волнового поля, образующегося в области наблюдения. Волновое поле в этом случае представляется как некоторое стационарное случайное поле в трехмерном пространстве, порождающее случайный временной процесс в каждой его точке. Такое представление однозначно предполагает существование в волновом поле пространственно-временных флуктуаций с теми или иными корреляционными параметрами,

зависящими от пространственно частотных параметров волнового поля [2]. В настоящей работе рассматривается природа образования этих пространственных флуктуаций и их временные и пространственные свойства, определяющие соответствующие временные и пространственные параметры когерентности волнового поля.

Численное моделирование мгновенных флуктуаций в волновом поле

Предполагается, что пространственные флуктуации в частотно широкополосном волновом поле с широким угловым спектром образуются в результате сложения и мгновенной интерференции элементарных волн с разными частотами и разными направлениями распространения в пределах частотного и углового спектров поля [2]. Численное моделирование этих флуктуаций может быть выполнено с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа [1] и суммирования по всем частотным составляющим поля. Расчет флуктуаций для разных моментов времени дает возможность визуализации и наблюдения пространственно-временной динамики пространственных флуктуаций поля [2].

Время корреляции волнового поля в определенной точке определяется шириной частотного спектра поля. Длины поперечной корреляции определяются шириной углового спектра поля в соответствующих направлениях. Длина продольной корреляции – вдоль направления распространения возмущений поля, ограничивается или шириной частотного спектра, или шириной углового спектра поля в области наблюдения, или совместно. При узком угловом спектре частотно широкополосного поля волновые флуктуации, которые можно рассматривать в виде трехмерных волновых цугов, распространяются в пространстве в среде без частотной дисперсии, не испытывая декорреляционных изменений. Скорость их распространения равна фазовой скорости отдельных возмущений. При широком угловом спектре возникают декорреляционные изменения волновых цугов в процессе их распространения. Длина коррелированного пробега волнового цуга определяется шириной углового спектра поля. При этом скорость распространения флуктуаций становится меньше фазовой скорости. При достаточно широком угловом спектре поля исчезает направленное смещение флуктуаций и наблюдается только их бурление (кипение). В этом режиме длина продольной когерентности волнового поля определяется преимущественно шириной углового спектра поля – не зависит от ширины частотного спектра.

Заключение

Моделирование пространственных флуктуаций в волновом поле протяженного источника света позволяет в наглядном виде выявить пространственные когерентные свойства волнового поля, в том числе и в продольном направлении, выявить особенности распространения флуктуаций в зависимости от частотного и углового спектров поля. Статистическая анализ флуктуаций поля позволяет рассчитать корреляционные функции волнового поля и провести сравнение с корреляционными функциями, предсказываемыми в теории случайных полей.

Литература

- [1] Борн М., Вольф Э., Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [2] Рябухо В.П. и др. Мгновенные спекл-структуры в частично когерентном оптическом волновом поле с широкими частотным и угловым спектрами //Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 126. – №. 2. – С. 186–196.

УДК 535.411

**МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ
МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Александр Сергеевич Мачихин

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация

Представлены результаты анализа эффективности применения акустооптической (АО) фильтрации широкополосного излучения при решении задач мультиспектральной цифровой голографической микроскопии. Такой подход может использоваться как для последовательной регистрации голограмм в выбранных интервалах длин волн, так и для одновременного получения нескольких спектральных голограмм в одном изображении. Разработаны экспериментальные установки на основе интерферометров Маха-Цендера и общего пути с АО фильтрацией излучения различных источников света. Проведен анализ тестовых структур и биологических образцов. Продемонстрирована эффективность данного подхода для количественной фазовой визуализации и профилометрии микрообъектов

Ключевые слова

Цифровая голография, акустооптическое взаимодействие, спектральная визуализация, количественная фазовая микроскопия

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект #20-58-18007) с использованием оборудования Центра коллективного пользования НТЦ УП РАН

**MULTI-SPECTRAL DIGITAL HOLOGRAPHY BASED ON ACOUSTO-OPTIC
WAVELENGTH SCANNING**

Alexander S. Machikhin

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

This research is dedicated to the theoretical and experimental study of acousto-optical (AO) filtration of broadband radiation for multispectral digital holographic microscopy applications. This approach can be used both for sequential registration of holograms in selected wavelength intervals, and for simultaneous acquisition of several spectral holograms in one image. Experimental setups based on Mach-Zender and common path interferometers with AO filtration of light from various sources have been developed. The analysis of test structures and biological samples confirmed the effectiveness of this approach for quantitative phase visualization and profilometry of microscopic objects

Keywords

Digital holography, acousto-optic interaction, image processing, spectral visualization, quantitative phase imaging

Acknowledgements

The study is supported by Russian Foundation for Basic Research (project 20-58-18007) and performed using the equipment of the Shared Research Facilities of the Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences

Введение

Мультиспектральная цифровая голография находит применение при решении задач неразрушающего контроля и биомедицинской диагностики [1–3]. Она обеспечивает измерение пространственного распределения толщины и показателя преломления в отсутствие априорной информации об объекте, контрастное выделение и идентификацию элементов и процессов по их спектральным характеристикам, увеличение осевого разрешения и другие возможности. Как правило, данный режим реализуют за счет

последовательной смены источников света или светофильтров, спектральной перестройки или пространственного сканирования спектрального разложения. При исследовании подвижных объектов и быстропротекающих процессов применяют мультиплексированную запись нескольких спектральных голограмм в одном изображении. В настоящей работе показано, что благодаря произвольной спектральной адресации, возможности работы в многочастотном режиме, отсутствию подвижных элементов и другим достоинствам АО фильтров, системы для мультиспектральной голографии на их основе превосходят многие существующие решения и обеспечивают высокоточные измерения.

Используемые методы и подходы

Для экспериментальной проверки эффективности данного подхода был собран экспериментальный стенд, схема которой показана на рисунке. Исследуемый объект 5 устанавливают в объектное плечо интерферометра 4. Задают N частот ультразвука, подаваемых на АО фильтр 3 и соответствующих требуемым N длинам волны λ_i излучения источника света 1. После интерферометра 4 распространяются пространственно совмещенные и одинаково поляризованные пучки, формирующие N интерференционных картин, которые регистрируются одновременно одним матричным приемником излучения 6. Цифровая обработка изображения позволяет разделить спектральные голограммы и вычислить амплитудные и фазовые распределения на всех λ_i . В ходе экспериментальных исследований использовались интерферометр Маха-Цендера [4] и двухкомпонентный интерферометр общего пути [5], а также различные широкополосные источники света (галогенная лампа, плазменный источник, суперконтинуум).

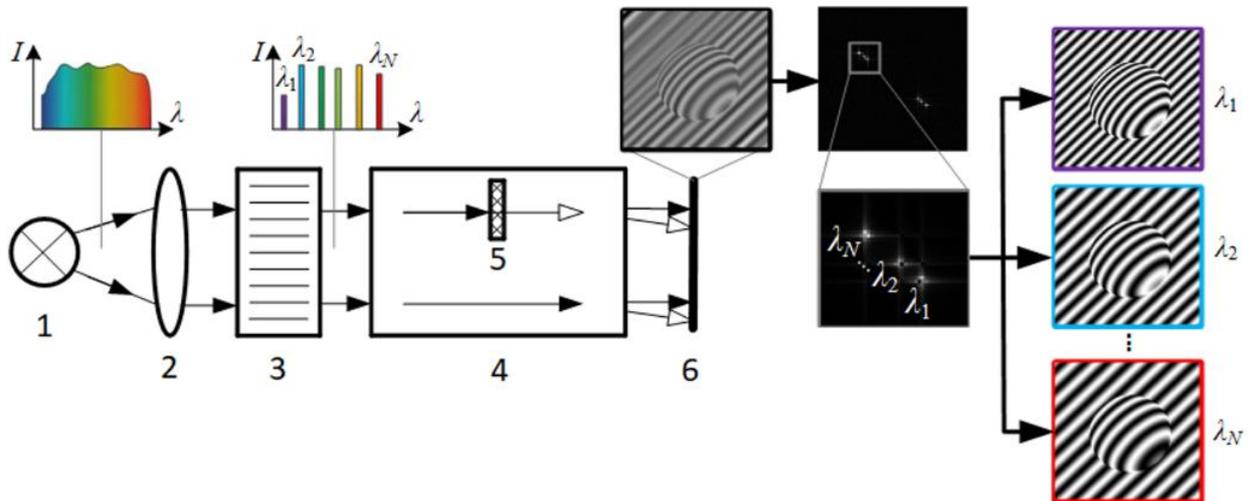


Рисунок. Цифровая голография на основе мультичастотной АО фильтрации излучения

Сравнение вычисленных пространственных распределений фазовой задержки, вносимой тестовыми структурами и исследованными биологическими образцами, со справочными значениями, полученными другими методами, показывает высокую точность измерения их профилей и показателей преломления.

Результаты и заключение

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований показано, что АО фильтрация широкополосного излучения обеспечивает возможность как

последовательного, так и одновременного получения цифровых голографических изображений микрообъектов в произвольных узких спектральных интервалах в пределах широкого диапазона без механического сканирования. Данный подход может найти применение в задачах анализа быстропротекающих процессов, прецизионной фазовой микроскопии и профилометрии.

Литература

- [1] Fu Y., Pedrini, G., Hennelly B.M., Groves R.M., Osten, W. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement //Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – V. 47. – Is. 5. – P. 552–557.
- [2] Dubey V., Singh G., Singh V., Ahmad A., Mehta, D. S. Multispectral quantitative phase imaging of human red blood cells using inexpensive narrowband multicolor LEDs //Applied optics. – 2016. – V. 55. – Is. 10. – P. 2521–2525.
- [3] Mir M., Bhaduri B., Wang R., Zhu R., Popescu G. Quantitative phase imaging //Progress in optics. – 2012. – V. 57. – Is. 133-37. – P. 217.
- [4] Polschikova O., Machikhin A., Gorevoy A., & Stoykova E. Single-shot multiwavelength digital holography using Bragg diffraction of light by several ultrasound waves //JOSA A. – 2022. – V. 39. – Is. 2. – P. A79–A85.
- [5] Machikhin A., Polschikova O., Vlasova A., Pozhar V. Lens-in-lens common-path interferometer for quantitative phase imaging //Journal of Optics. – 2019. – V. 21. – Is. 12. – P. 125801.

УДК 535.417

ОПТИЧЕСКИЙ АБСОРБЦИОННЫЙ МИКРОТОМОГРАФ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В БИОЛОГИЧЕСКИХ МИКРООБЪЕКТАХ

Геннадий Генрихович Левин, Алексей Андреевич Самойленко

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, г. Москва, Россия

Аннотация

Рассмотрена возможность локализации изменений внутри клетки и разделение влияния изменений оптических свойств клетки от изменения её геометрии за счёт применения методов локальных алгоритмов томографии. Томография, в том числе локальная, может быть реализована как на основе простых проекций, так и на основе сдвиговых интерферограмм, каковые представляют собой дифференциальные проекции 1-го порядка, и на основе дифференциальных проекций 2-го порядка

Ключевые слова

Оптическая абсорбционная томография, локальные томографические алгоритмы, томография живой клетки

OPTICAL ABSORPTION MICROTOMOGRAPH FOR THE STUDY OF THE INTERNAL STRUCTURE IN LIVING CELLS

Gennadi G. Levin, Aleksey A. Samoilenko

The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

Abstract

The possibility of localization of changes inside the cell and separation of the effect of changes in the optical properties of the cell from changes in its geometry through the use of methods of local tomography algorithms is considered. Tomography, including local tomography, can be implemented both on the basis of simple projections and on the basis of shear interferograms, which are differential projections of the 1st order, and on the basis of differential projections of the 2nd order

Keywords

Optical absorption tomography, local tomographic algorithms, living cell tomography

Введение

В настоящее время актуальной научно-исследовательской и биомедицинской задачей является создание новых методов лабораторной диагностики, позволяющих исследовать локальные динамические процессы в живой клетке. Живая клетка — прозрачный объект, который описывается трехмерным распределением показателя преломления и оптической плотности.

Следует отметить, что исследование изменений в различных областях живой клетки в физиологических и моделируемых патофизиологических условиях методологически реализовано не в полной мере. Так, разделить влияние динамических флуктуаций мембраны и плотности белка внутри клетки из оптических измерений крайне затруднительно. Поэтому большинство методов предполагает измерение оптической толщины клетки, характеризующей обе эти величины, а затем из априорной информации определяют влияние изменения мембраны либо плотности внутри клетки [1].

Используемые методы и подходы

Метод оптической фазовой микроскопии позволяет получать информацию об изменении комплексного показателя преломления в живой клетке. При этом регистрация и анализ быстрых внутриклеточных процессов, таких как синтез и распад оптически

активных соединений, изменение спектра белков мембраны клетки, морфология отдельных органелл, ответные реакции на внешнее воздействие, сопряжены с рядом трудностей. В частности, с дифференцированием областей исследования, повышением чувствительности фазовых методов, временного разрешения измерения. В настоящее время именно томографическое направление фазовой и абсорбционной микроскопии активно развивается.

Локализация изменений внутри клетки и разделение влияния изменений оптических свойств клетки от изменения её геометрии в нашей работе достигается за счёт применения методов томографии. Томография, в том числе локальная, может быть реализована как на основе простых проекций, так и на основе сдвиговых интерферограмм, каковые представляют собой дифференциальные проекции первого порядка, и на основе дифференциальных проекций 2-го порядка [2].

Для получения сдвигового интерференционного изображения клетки объект освещается плоским параллельным пучком монохроматического света с низкой пространственной когерентностью. Световое излучение, прошедшее через объект, собирается отображающим микрообъективом и, пройдя так называемый фурье-объектив, направляется в интерферометр Майкельсона, состоящий из светоделительного кубика и двух плоских зеркал. Зеркала находятся в задней фокальной плоскости фурье-объектива, поэтому малый наклон зеркала одного из зеркал приводит только к поперечному сдвигу пучков после второго фурье-объектива, без их взаимного наклона. Величина поперечного сдвига волновых фронтов мала, она не должна превышать размер диска Эйри для данного типа микрообъективов, поэтому для интерференции данных волновых фронтов достаточно пространственной когерентности излучения от точечного светодиода. Для восстановления фазовых изображений используется метод фазовых шагов, дополнительная разность хода между интерферирующими пучками вносится смещением одного из зеркал интерферометра вдоль направления оптической оси с помощью пьезопривода. Для получения обычного изображения на просвет достаточно всего лишь перекрыть одно из плеч интерферометра Майкельсона, что даёт канал информации о структурах объекта, поглощающих свет (абсорбционных).

Результаты и заключение

В нашей работе с помощью микротомографа в абсорбционном режиме были получены изображения внутренней структуры отдельных клеток микроводоросли *N. lacustris*.

Литература

- [1] Popescu G., Ikeda T., Goda K., Best-Popescu C.A., Laposata M., Manley S., Dasari R.R., Badizadegan K., Feld M.S. Optical measurement of cell membrane tension //Physical review letters. – 2006. – V. 97. – Is. 21. – P. 218101.
- [2] Vishnyakov G.N., Levin, G.G., Minaev V.L., et al. Investigation of the Method of Local Optical Tomography by Differential Projections //Optics and Spectroscopy. – 2018. – V. 125. – Is. 6. – P. 1065-1073.

УДК 535.417

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ

Юрий Николаевич Захаров

Гарвардский университет, Бостон, США

Аннотация

В работе представлены принципы и схемы сканирующей лазерной голографии, и их воплощение в цифровой голографической микроскопии, отмечены особенности восстановления голограмм, записанных в сканирующем режиме, вызванные спецификой сканирования

Ключевые слова

Цифровая голографическая микроскопия, лазерная сканирующая микроскопия

Благодарности

Автор благодарен специалистам, чьи работы из открытой печати, использованы для данной работы

HOLOGRAPHIC SCANNING MICROSCOPY

Iurii N. Zakharov

Harvard University, Boston, US

Abstract

This report includes principles and schematics of scanning laser holography and their implementation in digital holographic microscopy, it is noted features of scanning mode recorded hologram reconstruction, caused by scanning specifics

Keywords

Digital holographic microscopy, laser scanning microscopy

Acknowledgements

The author is acknowledged to the experts in the observed field, using open source for this review

В современных научных исследованиях прочное место заняла как лазерная сканирующая микроскопия, представленная ведущими мировыми производителями микроскопов, так и цифровая голографическая микроскопия, хотя и имеющая коммерческие предложения, в основном опирающаяся на собственные разработки исследователей. Одна из интересных техник, обладающих большим потенциалом в 3D микроскопии - это оптическая сканирующая голография (ОСГ) [1, 2]: вместо того, чтобы фиксировать интерференцию опорной и предметной волн, в ОСГ облучают объект интерференционным полем, созданным путем совмещения двух когерентных пучков, а затем сканируют объект этим суммарным пучком, фиксируя пропущенный или отражённый свет точечным детектором с последующим восстановлением такой голограммы дискретным преобразованием Фурье.

Другой подход основан на применении лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ) и построении голографической схемы на его основе. Он сочетает принципы ЛСМ и цифровой голографии. В процессе поточечного или линейного сканирования регистрируется результат интерференции опорного и предметного лучей, который сохраняется в виде двумерного массива данных, представляющего цифровую голограмму. Процесс реконструкции записанных голограмм сводится к программной обработке таких массивов данных.

Уже 25 лет назад был описан [3] и впоследствии запатентован [4] довольно сложный по конструкции конфокальный сканирующий лазерный микроскоп. В последнее десятилетие были также предложены другие схемы:

- цифровой конфокальный микроскоп [5], схема которого содержит двойной интерферометр, настроенный на пропускание или отражение света с пошаговой записью цифровой голограммы, обработка основана на быстром преобразовании Фурье и фильтрации с помощью виртуальной диафрагмы с динамически меняющимся фокусом;
- синтетическая оптическая голография [6], которая реализуется на базе конфокального микроскопа путем добавления светоделителя и линейно движущегося зеркала, генерирующего синтетическую эталонную волну, аналогичную наклонной плоской волне в широкоугольной внеосевой голографии;
- количественная фазово-контрастная конфокальная микроскопия [7], в которой образец находится на движущемся столике, а освещение происходит коллимированной линией, опорная волна, направленная на камеру под небольшим углом, формирует внеосевую голограмму; вариант этой схемы [8] содержит гальваническое зеркало.

Все вышеописанные схемы, кроме последней, используют для сканирования подвижный предметный столик, что делает процесс сканирования чрезвычайно медленным.

Первое воплощение голографической сканирующей микроскопии на базе коммерческого конфокального лазерного сканирующего микроскопа было нами представлено в 2010 году [9] и получило дальнейшее развитие [10]. Предложенная нами схема реализована путем добавления в микроскоп LSM-510 DuoScan (Carl Zeiss) всего лишь одного зеркала, формирующего опорную волну. Однако такое простое техническое решение обернулось необходимостью разработки специальных алгоритмов восстановления голограмм.

Литература

- [1] Lam E.Y. et al. Three-dimensional microscopy and sectional image reconstruction using optical scanning holography // *Applied Optics*. – 2009. – V. 48. – Is. 34. – P. H113-H119.
- [2] Tsai C.M. et al. Optical scanning holography with a polarization directed flat lens // *Applied Optics*. – 2021. – V. 60. – Is. 10. – P. B113-B118.
- [3] Herring R.A. Confocal scanning laser holography, and an associated microscope: a proposal // *Optik (Stuttgart)*. – 1997. – V. 105. – Is. 2. – P. 65-68.
- [4] Herring R.A. Confocal scanning holography microscope. 2009. US Patent 7639365 B2.
- [5] Goy A.S., Psaltis D. Digital confocal microscope // *Optics Express*. – 2012. – V. 20. – Is. 20. – P. 22720-22727.
- [6] Schnell M., Carney P.S., Hillenbrand R. Synthetic optical holography for rapid nanoimaging // *Nature communications*. – 2014. – V. 5. – Is. 1. – P. 1-10.
- [7] Liu C., Marchesini S., Kim M.K. Quantitative phase-contrast confocal microscope // *Optics Express*. – 2014. – V. 22. – Is. 15. – P. 17830-17839.
- [8] Liu C. et al. High-speed line-field confocal holographic microscope for quantitative phase imaging // *Optics Express*. – 2016. – V. 24. – Is. 9. – P. 9251-9265.
- [9] Zakharov Y.N., Lobyntseva V.V., Holographic technique for 3d optical microscopy // *Speckle2010: speckle fields forever*. Technical Program. Abstracts selection. Florianopolis – SC – Brazil.
- [10] Zakharov Y. et al. Holographic scanning microscopy—novel approach to digital holography and laser scanning microscopy // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*. – Optica Publishing Group, 2014. – P. DW5B. 1.

УДК 621.373.826

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ И ЛАЗЕРЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ СПЕКТРОМ НА ИХ ОСНОВЕ

Анастасия Павловна Погода*, Виктор Михайлович Петров**

*Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" имени Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Россия

** Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Предмет исследования: В работе исследуется связь внутрирезонаторных голографических амплитудно-фазовых, а также голографических решёток коэффициента усиления среды с характеристиками спектров генерации мощных твёрдотельных лазеров на основе кольцевых и многопроходных резонаторов. **Основные результаты:** экспериментально и теоретически показано, что возникновение в результате многократной интерференции распространяющихся в резонаторе волн амплитудно-фазовых решёток, а также решёток коэффициента усиления активной среды, приводит к заметному влиянию на пространственно-временные и статистические характеристики генерируемого излучения. **Практическая значимость:** Внутрирезонаторные голографические решётки позволяют создавать мощные импульсные лазеры с высоким качеством пучка, а также мощные, перестраиваемые источники терагерцового излучения с узкой диаграммой направленности

Ключевые слова

Голографические решётки, решётки коэффициента усиления активной среды, мощные импульсные лазеры, перестраиваемые источники терагерцового излучения

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2

INTRACAVITY HOLOGRAPHIC GRATINGS AND SPECTRUM-CONTROLLED LASERS BASED ON THEM

Anastasiya P. Pogoda, Victor M. Petrov

*Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

** ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

Subject of research: The paper investigates the relationship of intracavity holographic amplitude-phase, as well as holographic arrays of the gain factor of the medium with the characteristics of the generation spectra of high-power solid-state lasers based on ring and multi-pass resonators. **Main results:** It has been experimentally and theoretically shown that the occurrence of amplitude-phase lattices propagating in the resonator as a result of multiple interference of waves, as well as arrays of the gain coefficient of the active medium, leads to a noticeable effect on the spatiotemporal and statistical characteristics of the generated radiation. **Practical significance:** Intracavity holographic gratings make it possible to create powerful pulsed lasers with high beam quality, as well as powerful, tunable sources of terahertz radiation with a narrow beam-forming properties

Keywords

Holographic gratings, active medium gain gratings, high-power pulsed lasers, tunable sources of terahertz radiation

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Addendum No. 075-03-2020-045/2 dated 09.06.2020

В лекции рассмотрены основы оптических явлений, связанных с отражательными голографическими решётками Брэгга, примеры возникновения голографических решёток в активных средах и описаны их свойства, а также рассмотрены различные активные среды, в том числе и $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}$ [1–15]. Для реализации режима генерации на двух не кратных длинах волн и перестройки по длине волны использовалась схема резонатора с внесённой

пропускающей решеткой Брэгга, записанной в фототерморефрактивном стекле. Продемонстрирована впервые в отечественной практике узкополосная генерация излучения одновременно на двух не кратных длинах волн в полосе 795–895 нм на кристалле $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}$. Показано, что объемная пропускающая решетка Брэгга может использоваться для плавного изменения центральной длины волны генерируемого лазерного излучения за счет дополнительной обратной связи через зеркало с высоким коэффициентом отражения, расположенное в первом порядке дифракции. Импульсные лазеры с перестраиваемой длиной волны находят применение в различных научных и практических задачах, в том числе экологическом мониторинге состояния атмосферы. Режим генерации двух излучений на не кратных длинах волн, исследованный в данной работе, позволяет создавать мощные импульсные источники терагерцового излучения в диапазоне 15,5–27,1 ТГц.

Литература

- [1] Fischer M.C. et al. Invited review article: pump-probe microscopy //Review of Scientific Instruments. – 2016. – V. 87. – Is. 3. – P. 031101.
- [2] Lefort C. A review of biomedical multiphoton microscopy and its laser sources //Journal of physics D: Applied physics. – 2017. – V. 50. – Is. 42. – P. 423001.
- [3] Stephens D.J., Allan V.J. Light microscopy techniques for live cell imaging //science. – 2003. – V. 300. – Is. 5616. – P. 82-86.
- [4] Pachitariu M. et al. Suite2p: beyond 10,000 neurons with standard two-photon microscopy //BioRxiv. – 2017. – P. 061507.
- [5] Zong W. et al. Fast high-resolution miniature two-photon microscopy for brain imaging in freely behaving mice //Nature methods. – 2017. – V. 14. – Is. 7. – P. 713-719.
- [6] Pichon P. et al. Tunable UV source based on an LED-pumped cavity-dumped Cr: LiSAF laser //Optics express. – 2019. – V. 27. – Is. 16. – P. 23446-23453.
- [7] Van Nguyen D. et al. Tunable dual wavelength and narrow linewidth laser using a single solid-state gain medium in a double Littman resonator //Optics Communications. – 2021. – V. 496. – P. 127131.
- [8] Li J. et al. Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: a review //Remote Sensing. – 2020. – V. 12. – Is. 17. – P. 2771.
- [9] Tunable laser applications / ed. by Duarte F.J. Boca Raton: CRC press, 2008. 480 p.
- [10] Beaud P. et al. Gain properties of $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}^{3+}$ //Optics letters. – 1992. – V. 17. – Is. 15. – P. 1064-1066.
- [11] Payne S.A. et al. Properties of Cr: LiSrAlF_6 crystals for laser operation //Applied Optics. – 1994. – V. 33. – Is. 24. – P. 5526-5536.
- [12] Payne S.A. et al. Laser performance of $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}^{3+}$ //Journal of Applied Physics. – 1989. – V. 66. – Is. 3. – P. 1051-1056.
- [13] Pogoda A.P. et al. Intra-Cavity Holographic Gratings and Lasers with a Controllable Spectrum Based on Them //Optics and Spectroscopy. – 2021. – V. 129. – Is. 12. – P. 1321-1326.
- [14] Demirbas U. et al. Femtosecond Cr: LiSAF and Cr: LiCAF lasers pumped by tapered diode lasers //Optics Express. – 2011. – V. 19. – Is. 21. – P. 20444-20461.
- [15] Balembois F. et al. Tunable blue light source by intracavity frequency doubling of a Cr-doped LiSrAlF_6 laser //Applied physics letters. – 1992. – V. 61. – Is. 20. – P. 2381-2382.

УДК 535.417

О ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РЕЛАКСОМЕТРИИ

Андрей Викторович Вениаминов

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Обзор посвящён методу экспериментального исследования медленной диффузии за счёт записи в исследуемом объекте голограммных структур и отслеживании их дифракционной эффективности. Рассмотрены эффект дополнительных решёток и его применение для создания объёмных голограммных элементов, особенности диффузионной релаксации в пространственно неоднородных средах

Ключевые слова

Диффузионная релаксация, дополнительные решётки, реоксан

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, госзадание 2019–1080

ON HOLOGRAPHIC RELAXOMETRY

Andrey V. Veniaminov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The review is devoted to the experimental technique for studying slow diffusion by recording hologram structures in the specimen and monitoring their diffraction efficiency. The effect of complementary gratings and its application to the creation of volume diffraction elements, diffusion-driven relaxation in spatially inhomogeneous media are considered

Keywords

Diffusion-driven relaxation, complementary gratings, reoxan

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, goszadanie no. 2019-1080

Голографическая релаксометрия – метод изучения микроскопической подвижности, использующий интерференционную запись периодических структур в исследуемом объекте и отслеживание изменения интенсивности дифрагирующего на них излучения, происходящего в результате их диффузионного размывания. Он концептуально прост и универсален, применим к исследованию твёрдых тел, жидкостей и паров, но прежде всего структурированных аморфных тел, относимых к мягкой материи. Кроме диффузии, метод может быть обращён на перенос тепла, фототрансформации, дрейф. Благодаря доступности создания интерференционных структур с малым пространственным периодом, следовательно высоким градиентом концентрации, этот подход чувствителен к рекордно медленным движениям, таким как молекулярная диффузия в стеклообразных полимерах. Возможность перестраивать в широких пределах пространственный масштаб экспериментов позволяет учесть пространственную неоднородность материалов.

Это, возможно, наименее голографический из всех голографических методов, часто воспринимаемый скорее с точки зрения рассеяния света, а не голографии. Но один из источников метода – выяснение причин нестабильности голограмм, записанных в полимерных средах, таких как реоксан, и важным результатом его развития стало на первый взгляд парадоксальное создание высокоселективных объёмных голограммных элементов за счёт диффузионного разрушения (релаксации) периодических структур, что может рассматриваться как предельное выражение так называемого эффекта дополнительных решёток.

УДК 004.81

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ

Александр Владимирович Павлов

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрена задача моделирования принятия решения как выбора альтернативы в противоречивых условиях. Задача рассмотрена на примере антагонистической игры «дилемма заключенного» и формализована моделью логики с исключением. Показано решение задачи посредством $6f$ схемы голографии Фурье кольцевой архитектуры, соответствующей биологически мотивированной концепции «кольца возбуждения» и реализующей когнитивный диссонанс как атрибут принятия решения. Дана аналитическая модель, приведены результаты численного моделирования и показано их соответствие результатам натурных экспериментов. По результатам обсуждены возможные нейросетевые корреляты такого атрибута человека, как нравственность

Ключевые слова

Голография, принятие решения, выбор альтернативы, когнитивный диссонанс, преобразование Фурье, логика с исключением, кольцо возбуждения

HOLOGRAPHIC METHODS FOR MODELING OF DECISION MAKING UNDER CONTRADICTIONS

Alexander V. Pavlov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The task of modeling decision-making as an alternative choice in contradictory conditions is considered. The problem is considered by the example of the antagonistic game "Prisoner's Dilemma" and formalized by the logic with an exception. The solution of the problem by means of the $6f$ Fourier holography scheme of the resonance architecture corresponding to the biologically motivated concept of the "Sensation Circle" and realizing cognitive dissonance as an attribute of decision-making is shown. An analytical model is given, the results of numerical modeling are presented and their correspondence to the results of published field experiments is shown. Referring to the results, possible neural network correlates of such an attribute of a person as individual morality are discussed

Keywords

Holography, Decision Making, Choice of Alternative, Cognitive Dissonance, Fourier-transform, Logic with Exception, Sensation Circle

Введение

Под принятием решения здесь понимается выбор альтернативы. Принятие решения – ключевой момент жизнедеятельности любого существа. Наибольший интерес и наибольшие сложности в понимании, моделировании и реализации искусственными средствами вызывает принятие решения в неоднозначных [1] и противоречивых условиях [2]. В последнем случае ярко проявляются такие атрибуты человека, как нравственность и свобода воли (или отказ от них, что тоже – выбор). Принятие решения исследуется на модельных ситуациях, описываемых теорией игр. Ситуации противоречий адекватны игры из класса антагонистических и многостадийных, позволяющие моделировать такой характерный феномен, как когнитивный диссонанс [3].

В настоящей работе задача рассмотрена на примере некооперативной игры «Дилемма заключенного», имеющей ярко выраженный нравственный аспект. Основное внимание обращено на поиск ответа – почему в одинаковых обстоятельствах и в рамках одной и той же логики разные игроки принимают разные решения?

Подход

Подход к поиску ответа на данный вопрос основан на тезисе о важности индивидуальных ментальных особенностей игрока, которые не идентичны, но в высокой степени коррелированы со свойствами материального носителя логики принятия решения – его нейронной сети (НС). Как аналог НС взята схема голографии Фурье.

Моделируется ситуация принятия решения одним из двух злоумышленников, допрашиваемых в полиции «по горячим следам», как выбора из двух альтернатив: молчать на допросе или предать подельника. При отсутствии информации о решении подельника или если его решение не противоречит убеждениям игрока, логика принятия решения принадлежит классу монотонных. Если же решение подельника противоречит убеждениям игрока, то его выбор описываем логикой с исключением, в которой информация о решении подельника противоречит основному правилу логики принятия решения, например, информация о молчании подельника противоречит убеждению, что предать – выгодно.

Логика с исключением реализуется *6f* схемой голографии Фурье кольцевой архитектуры, соответствующей биологически мотивированной концепции А.М. Иваницкого [4]. Кольцевая архитектура позволяет реализовать когнитивный диссонанс, возникающий при поступлении информации о молчании подельника. Решение по условиям игры принимается на первых итерациях редуцирования когнитивного диссонанса.

Модель принятия решения и результаты

Дана аналитическая модель логики, в которой основное правило принятия решения и исключение из него связаны преобразованием Фурье. Определена зависимость «точки равновесия», в которой оценка решения предать при информации о молчании подельника равна той же оценке при отсутствии информации о решении другого игрока от характеристик обучающих образов и фильтрации в сенсорных трактах и синаптических контактах при обучении НС. Высокочастотная фильтрация, соответствующая повышению внимания к деталям, ведет к повышению оценки решения предать даже при молчании подельника. Напротив, низкочастотная фильтрация, ведущая к более общему взгляду на мир и проблему, ведет к снижению привлекательности предательства.

Заключение

Показана роль индивидуальных особенностей нейросети как материального носителя логики принятия решения – нелинейности передаточных характеристик сенсорных трактов и чувствительности синаптических контактов в оценке решения.

Литература

- [1] Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности: Правила и предубеждения. Харьков: Издательство Институт прикладной психологии «Гуманитарный Центр», 2005. 632 с. (пер. с англ.).
- [2] Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 144 с.
- [3] Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Ювента, 1999. 317 с.
- [4] Ivanitskii A.M. Information synthesis in key parts of the cerebral cortex as the basis of subjective experience //Neuroscience and Behavioral Physiology. – 1997. – V. 27. – Is. 4. – P. 414-426.

**СИНГУЛЯРНАЯ ОПТИКА
И
СТРУКТУРИРОВАННЫЙ СВЕТ**

УДК 535.3, 535.4

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАХА-ЦЕНДЕРА

Наталья Дмитриевна Осинцева*, Юлия Юрьевна Чопорова*, Борис Александрович Князев*,
Василий Валерьевич Герасимов*, Владимир Сергеевич Павельев**

*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
Россия

**Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(Самарский университет), г. Самара, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты трансформирования Гауссова пучка ТГц диапазона в бесселеву моду с помощью фазовых аксиконов. Показано сравнение экспериментальных и расчетных данных совмещения двух разнозакрученных оптических вихрей в одном пучке в оптической схеме Маха-Цендера. Исследована возможность идентификации бесселевой моды одномодовых и многомодовых пучков с топологическими зарядами $l=-1, -2$ с помощью бинарных аксиконов с $l = \pm 1, \dots, \pm 4$

Ключевые слова

Бесселева мода, терагерцовое излучение, лазер на свободных электронах, бинарный фазовый аксикон, комбинированный топологический заряд, идентификация моды

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20202) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения"

MULTIPLEXING AND IDENTIFICATION OF OPTICAL VORTICES IN MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

Natalya D. Osintseva, Yulia Yu. Choporova, Boris A. Knyazev, Vasily V. Gerasimov, Vladimir S. Pavelyev

*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

We report the results of the THz Gaussian beam formation to the Bessel mode using phase axicons. A comparison of experimental and calculated data on the alignment of two differently twisted optical vortices in one beam of the Mach-Zehnder optical scheme is shown. The paper is presented of the possibility of detecting the Bessel mode of single-mode and multimode optical vortices with topological charges $l=-1, -2$ using binary axicons with $l = \pm 1, \dots, \pm 4$

Keywords

Bessel mode, terahertz radiation, free electron laser, binary phase axicon, mixed beams, mode identification

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-72-20202) and using the equipment of the Center for Collective Use "Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation"

Введение

Одной из важных областей физики, на сегодняшний день, является область передачи информации и энергии с помощью излучения. Задачи этой сферы в основном решены в видимом и ближнем ИК диапазонах. Однако в области дальнего ИК (ТГц) решение этих проблем найдено пока не было. Новые возможности для решения этих задач открывают оптические вихри [1]. Такие пучки обладают спиральным волновым фронтом, высокой устойчивостью к распространению в фазово-неоднородной среде, что является благоприятным фактором для удаленного зондирования и передачи информации. У оптических вихрей можно независимо изменять спиновый и орбитальный угловой момент,

что существенно расширяет возможности их применения и повышает мультиплексность каналов передачи данных.

Используемые методы и подходы

Гауссов пучок монохроматического излучения Новосибирского лазера на свободных электронах [2] трансформировался в бесселеву моду с помощью дифракционных оптических элементов. В работе предложено комбинировать вихревые пучки с разной закрученностью l с помощью интерферометра Маха-Цендера. После передачи нескольких сигналов в одном пучке необходимо идентифицировать отдельные сигналы, содержащихся в составе такой многомодовой волны при помощи пространственной фильтрации. Процесс сводится к нахождению корреляции между неизвестным и заранее определенным сигналом, тогда на выходном изображении оптического коррелятора появится корреляционный пик.

Результаты и заключение

Показаны результаты мультиплексирования вихревых пучков ТГц диапазона с помощью интерферометрической системы. Исследования показали возможность идентификации бесселевой моды в многомодовом (рисунок) пучке с комбинацией топологических зарядов -1 и -2 . В качестве «фильтрующих» элементов использовались фазовые аксиконы с зарядами $|l|=1, \dots, 4$. В результате совпадения величины и знака закрученности формирующего и «фильтрующего» аксиконов наблюдалась δ -функция в центре и кометообразные кольца, образующие фурье-образ бесселева пучка. В случае негативного отклика наблюдалась нулевая интенсивность в центре, что свидетельствует о несовпадении мод, а также лучи, исходящие из центра дифракционной картины, количество которых определяется как $2l$ фильтрующего аксикона.

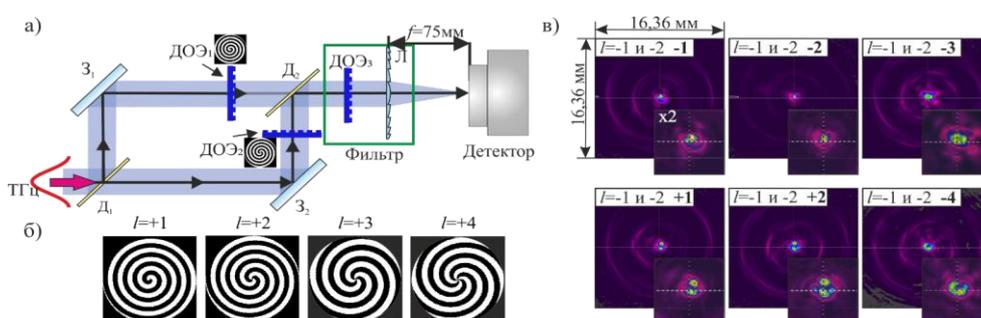


Рисунок. а) схема формирования многомодового пучка и идентификации бесселевой моды; б) фазовые маски аксиконов использованных в эксперименте; в) экспериментальные результаты детектирования бесселевой моды

Литература

- [1] Allen L. et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes //Physical review A. – 1992. – V. 45. – Is. 11. – С. 8185-8189.
 [2] Volodkin B. et al. Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation //Optical and Quantum Electronics. – 2016. – V. 48. – Is. 4. – P. 1-9.

УДК 535.417

ВИХРЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ С КВАДРАТОМ ПОЛИНОМА ЛАГЕРРА

Александра Александровна Савельева*, Елена Сергеевна Козлова**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(Самарский университет), г. Самара, Россия

**Филиал федерального государственного учреждения "Федеральный научно-исследовательский центр
"Кристаллография и фотоника" Российской академии наук", г. Самара, Россия

Аннотация

В данной работе показано, что вихревой пучок Лагерра-Гаусса (ЛГ) «в квадрате» является Фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы. В зоне дифракции Френеля такой пучок преобразуется в суперпозиции обычных пучков ЛГ, число которых равно числу колец у пучка ЛГ «в квадрате». Если кольцо всего одно, то пучок является структурно-стабильным. Также рассмотрен более общий пучок, являющийся «произведением» двух пучков ЛГ. Такой пучок будет Фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков ЛГ в «произведении» одинаковое. Рассмотренные пучки дополняют хорошо известный базис пучков ЛГ, которые интенсивно изучаются в связи с их устойчивостью при распространении в турбулентности

Ключевые слова

Оптический вихрь, топологический заряд, мода Лагерра-Гаусса, Фурье-инвариантность, преобразование Фурье, дифракция Френеля

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант № 18-19-00595

VORTEX LASER BEAMS WITH THE SQUARE OF THE LAGUERRE POLYNOMIAL

Alexandra A. Savelyeva, Elena S. Kozlova

*Samara National Research University, Samara, Russia

**IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia

Abstract

In this paper, we show that the squared Laguerre-Gauss (LG) vortex beam is Fourier-invariant and retains its structure at the focus of a spherical lens. In the Fresnel diffraction zone, such a beam is transformed into a superposition of conventional LG beams, the number of which is equal to the number of rings in the squared LG beam. If there is only one ring, then the beam is structurally stable. A more general beam, which is a “product” of two LG beams, is also considered. Such a beam will be Fourier-invariant if the number of rings in two LG beams in the “product” is the same. The considered beams complement the well-known basis of LG beams, which are intensively studied in connection with their stability during propagation in turbulence

Keywords

Optical vortex, topological charge, Laguerre-Gauss mode, Fourier invariance, Fourier transform, Fresnel diffraction

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 18-19-00595

Введение

Исследование оптических вихрей [1] является актуальной задачей на сегодняшний день. Большое количество статей посвящено способам их формирования [2] и применению для решения прикладных задач [3]. Так же одним из важных направлений исследований в данной области является поиск новых типов пучков, обладающих определенными свойствами [4]. Отметим, что существует достаточно большое количество различных подходов для создания и описания новых типов пучков. Однако, несмотря на это, не теряют свою актуальность и всем хорошо известные пучки Лагерра-Гаусса (ЛГ). На базе мод ЛГ разрабатываются новые типы оптических пучков, обладающих различными полезными

свойствами, которые имеют высокую практическую значимость для оптических коммуникаций, микро-манипулирования и фото-возбуждения атомов. В данной работе был предложен новый тип оптических пучков, амплитуда которых пропорциональна многочлену Лагерра в квадрате. Эти пучки расширяют базис мод ЛГ. Было проведено их теоретическое и численное исследование, показана их Фурье-инвариантность.

Используемые методы и подходы

Было проведено численное моделирование фокусировки пучков $(ЛГ)^2$ сферической линзой с помощью авторских скриптов на языке MATLAB. Отметим, что фокусировка сферической линзой эквивалентна преобразованию Фурье. Начальное поле представлялось в виде:

$$E_{2,n,m}(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{r^2}{w^2} + i2n\varphi\right) \left(\frac{r}{w}\right)^{2|m|} \left[L_m^{|m|}\left(\frac{r^2}{w^2}\right)\right]^2. \quad (1)$$

Длина волны падающего излучения $\lambda = 532$ нм. При моделировании использовались следующие параметры сетки: $L_x = L_y = 5$ мм, $dx = dy = 0,01$ мм.

Далее рассматривалась дифракция Френеля, которая представляется следующим интегралом:

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \frac{e^{ikz}}{z} \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x', y', 0) \times \exp\left(\frac{ik}{2z} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right) dx' dy'. \quad (2)$$

Для его численного расчета были использованы теорема о свертке и свойства преобразования Фурье, которые позволяют вычислить указанный интеграл через комбинацию прямых и обратного преобразований Фурье. Программа для расчета была также реализована на языке MATLAB.

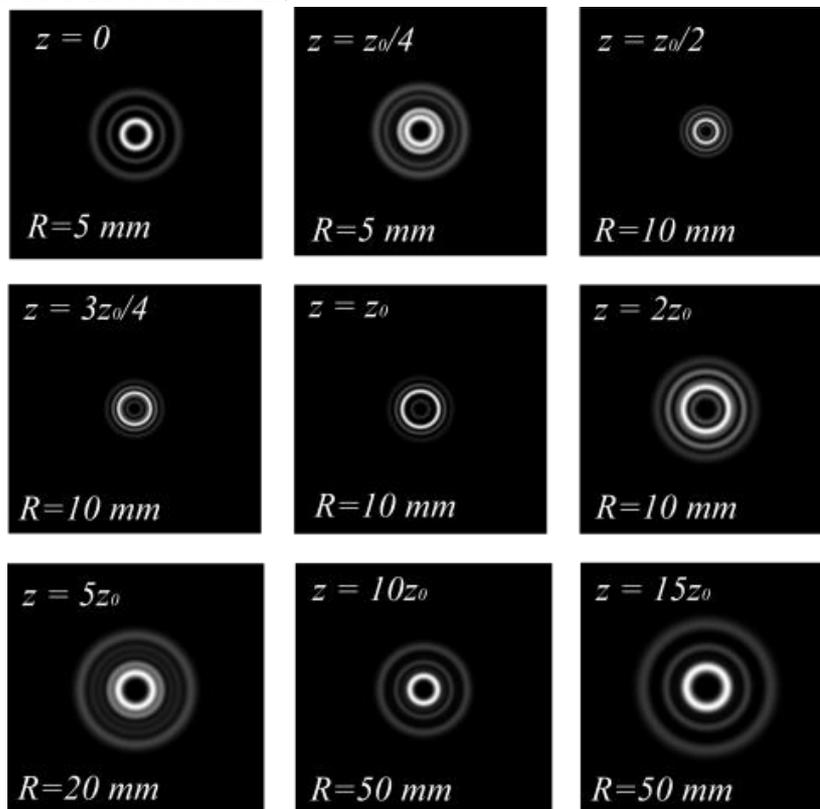


Рисунок. Распределения интенсивности пучка $(ЛГ)^2$ при $\lambda = 532$ нм, $w = 0.5$ мм ($z_0 \approx 1,476$ м), $n = 3$, $m = 2$ на расстоянии z в квадратной подобласти шириной $2R$

Результаты и заключение

В данной работе были рассмотрены пучки Лагерра-Гаусса в квадрате (ЛГ)². Результаты исследований представлены на рисунке. Результаты моделирования показали, что вихревой пучок ЛГ «в квадрате» является Фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы или в дальней зоне дифракции. В зоне дифракции Френеля такой пучок преобразуется в осевую суперпозицию обычных пучков ЛГ, число которых равно числу колец у пучка ЛГ «в квадрате». Если кольцо всего одно, то пучок является структурно-стабильным. Также рассмотрен более общий пучок, являющийся «произведением» двух пучков ЛГ. Такой пучок будет Фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков ЛГ в «произведении» одинаковое. Результаты работы могут найти свое применение в оптических коммуникациях.

Литература

- [1] Shen Y. et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light: Science & Applications*. – 2019. – V. 8. – Is. 1. – P. 1-29.
- [2] Lian Y. et al. OAM beam generation in space and its applications: A review // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2022. – V. 151. – P. 106923.
- [3] Liang Y. et al. Rotating of low-refractive-index microparticles with a quasi-perfect optical vortex // *Applied Optics*. – 2018. – V. 57. – Is. 1. – P. 79-84.
- [4] Li P. et al. Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices // *Optics Express*. – 2014. – V. 22. – Is. 7. – P. 7598-7606.

УДК 537.312.52:544.537

МНОГОСЕКТОРНЫЕ БИНАРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРПОЗИЦИИ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Виктория Александровна Шкуратова, Галина Кирилловна Костюк, Андрей Анатольевич Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты применения изготовленных на плавленом кварце многосекторных бинарных фазовых пластин для генерации суперпозиции оптических вихревых пучков. Лазерно-индуцированная микроплазма была использована в качестве точечного инструмента травления секторов, обеспечивающего требуемые фазовые сдвиги (π и $\pi/2$) относительно невытравленных секторов. Вытравленные сектора исследовались методами контактной профилометрии с вертикальным разрешением ± 10 нм и оптической микроскопии в режиме дифракционно-интерференционного контраста. Оценка качества генерируемых состояний суперпозиции вихревых пучков оценивалась с применением ПЗС камеры. Измеренная эффективность преобразования Гауссова пучка составила 92%. Одна из пластин была применена в оптической установке с наносекундным лазером (длина волны 1060 нм) для одновременной обработки полированной стали

Ключевые слова

Вихревые пучки, многосекторные бинарные фазовые пластины, лазерно-индуцированная микроплазма

Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20–71–10103]

MULTISECTOR BINARY PHASE PLATES FOR GENERATION OF VORTEX BEAMS SUPERPOSITION

Victoria A. Shkuratova, Galina K. Kostyuk, Andrey A. Petrov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The research describes the application results of multisector binary phase plates fabricated on fused silica to generate the optical vortex beams superposition. Laser-induced microplasma was used as a spot tool for etching sectors which provides the required phase shifts $-\pi$ and $\pi/2$ relative to non-etched sectors. Etched sectors were controlled by contact profilometry with vertical resolution ± 10 nm and diffraction-interference contrast optical microscopy. The quality of generated superposition states was evaluated with CCD camera. Measured efficiency of Gaussian beam conversion equaled to 92%. One of plates was used in an optical setup with the nanosecond laser (the wavelength of 1060 nm) for simultaneous processing of polished steel

Keywords

Vortex beams, multisector binary phase plates, laser-induced microplasma

Acknowledgements

The study is funded by the grant of Russian Science Foundation (project № 20-71-10103)

Введение

В последние годы значительное внимание уделяется способам формирования суперпозиции оптических вихревых пучков (ОВП) [1, 2], поскольку такие пучки находят широкое применение в различных областях научных исследований: лазерная микро- и нанообработка, оптическое манипулирование, коммуникации. Для генерации суперпозиции ОВП могут быть использованы многосекторные бинарные фазовые пластины (МБФП) [1], осуществляющие в дальнем поле мультиплицирование Гауссова пучка в серию пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятен (ДОП), окружающих по периметру центральную область с интенсивностью, стремящейся к нулю.

Применение МБФП в первую очередь обусловлено простотой их конструирования и надежностью использования по сравнению с другими оптическими элементами. Для изготовления МБФП могут быть применены литографические методы и прямая лазерная запись фемтосекундными импульсами [1].

Используемые методы и подходы

В настоящей работе мы предлагаем для изготовления на плавленом кварце МБФП, обеспечивающих разницу фаз π и $\pi/2$, использовать технологию обработки прозрачных диэлектриков лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) [3]. Для функционирования МБФП с разницей фаз π глубина травления секторов должна соответствовать значению $h = \lambda/2(n - 1)$, где n – показатель преломления материала МБФП, с разницей фаз $\pi/2$ – $h = \lambda/4(n - 1)$. Процесс формирования микрорельефа ЛИМП характеризуется двумя этапами преобразования энергии: (i) от лазерного излучения к плазме, (ii) от плазмы к энергии разложения и разрушения материала. Соответственно, результаты воздействия ЛИМП на прозрачный диэлектрик не имеют прямой аналитической зависимости от характеристик лазерного излучения [3], поэтому выбор параметров лазерного облучения для изготовления МБФП осуществлялся экспериментально.

Для подтверждения работоспособности изготовленных на длину волны $\lambda = 1.06$ мкм МБФП было проведено их тестированием в оптической схеме с применением ПЗС камеры. МБФП с уровнями фазы 0 и π также была применена при лазерной обработке пластины нержавеющей стали.

Результаты и заключение

Измеренная на контактном профилометре глубина травления изготовленных МБФП с разницей фаз π составила 1.180 ± 0.010 мкм, с разницей фаз $\pi/2$ – 0.590 ± 0.010 мкм. Шероховатостью поверхности в области воздействия ЛИМП составила 50 ± 10 нм.

Зарегистрированные распределения интенсивности в дальнем поле, полученные с применением изготовленных МБФП, доказали работоспособность элементов и показали, что количество формируемых в дальнем поле ДОП соответствует количеству секторов в МБФП с уровнями фазы 0 и π , а количество ДОП для МБФП с уровнями фазы 0 и $\pi/2$ в 2 раза меньше количества секторов. Установлено, что при числе секторов, превышающем 10, в формируемом распределении происходит увеличение эллиптичности и сближение ДОП.

Также при установке в оптическую схему МБФП с разницей фаз π в результате абляции под действием ДОП были получены отпечатки одинакового размера в форме круга на образце полированной нержавеющей стали. Результаты одновременной обработки стального образца демонстрируют реальные перспективы применения МБФП как для лазерной обработки металлов, так и для лазерной обработки других материалов.

Литература

- [1] Zhou L., et al. Directly writing binary multi-sector phase plates on fused silica using femtosecond laser // High Power Laser Science and Engineering. – 2018. – V. 6. – Is. e6. – P. 1-5.
- [2] Khonina S.N., Volotovskiy S.G. Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures // Journal of the Optical Society of America A. – 2010. – V. 27. – Is. 10. – P. 2188-2197.
- [3] Veiko V.P., et al. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // Quantum Electronics. – 2017. – V. 47. – Is. 9. – P. 842-848.

УДК 535.4

ВЕКТОР СТОКСА ВБЛИЗИ ФОКУСА ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Владислав Дмитриевич Зайцев, Сергей Сергеевич Стафеев

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет), г. Самара, Россия*

Аннотация

Рассмотрена острая фокусировка света с линейной поляризацией. С помощью уравнений Ричардса-Вольфа показано, что до и после плоскости фокуса имеются области, в которых поляризация круговая (эллиптическая). При переходе через плоскость фокуса направление вращения вектора поляризации в этих областях меняется на противоположное. Этот эффект позволяет использовать линейно поляризованный свет для вращения диэлектрических микрочастиц с небольшим поглощением вокруг своего центра масс

Ключевые слова

Линейная и круговая поляризация, острая фокусировка, формулы Ричардса-Вольфа, вектор Стокса, спиновой угловой момент

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595)

THE STOKES VECTOR NEAR THE FOCUS OF THE LASER BEAM WITH LINEAR POLARIZATION

Vladislav D. Zaitsev, Sergey S. Stafeev

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

The sharp focusing of light with linear polarization is considered. Using the Richards-Wolff equations, it is shown that before and after the plane of focus there are regions in which the polarization is circular (elliptical). When passing through the plane of focus, the direction of rotation of the polarization vector in these regions changes to the opposite. This effect makes it possible to use linearly polarized light to rotate dielectric microparticles with little absorption around their center of mass

Keywords

Linear and circular polarization, sharp focusing, Richards-Wolf formulas, Stokes vector, spin angular momentum

Acknowledgements

The work was funded by the Russian Science Foundation under grant #18-19-00595

Введение

Под острой фокусировкой лазерного излучения понимают фокусировку света линзами с высокой числовой апертурой, такую, при которой нельзя уже пренебречь векторной природой световой волны. Классические формулы для расчета светового поля в остром фокусе были получены Ричардсом и Вольфом в работе [1]. В настоящее время известно много работ, посвященных острой фокусировке света. Однако большая часть работ посвящена изучению поведения интенсивности в фокусе [2–6].

В данной работе рассмотрена острая фокусировка света линейной поляризации. Было показано, что при отдалении от плоскости фокуса возникают области, в которых поляризация перестает быть линейной. При этом при переходе через плоскость фокуса направление поляризации в этих областях меняется на противоположное.

Моделирование с помощью уравнений Ричардса-Вольфа

В данной работе с помощью формул Ричардса-Вольфа моделировалась фокусировка линейно-поляризованной плоской волны (длина волны 0,633 мкм) объективом с числовой апертурой $NA=0,95$.

В ходе исследования было показано, что поляризация после фокуса остается преимущественно линейной, но расходящийся пучок содержит области с эллиптической поляризацией. Эллиптичность поляризации при отдалении от фокуса может быть достаточно велика – в некоторых областях S_3 достигает значений $\pm 0,8$ (при $S_3=\pm 1$ поляризация полностью круговая). По результатам моделирования было видно, что в плоскостях, расположенных на одинаковых расстояниях до и после фокуса, первые две компоненты вектора Стокса не поменялись, а третья поменяла знак на противоположный. То есть после прохождения плоскости фокуса направление круговой поляризации меняется на противоположную – например, в первой четверти свет перед плоскостью фокуса был с левой круговой поляризацией, а после фокуса – с правой. Наличие правой круговой поляризации до фокуса во 2 и 4 квадрантах и левой круговой поляризации в 1 и 3 квадрантах согласуется с теоретическим предсказанием.

Проверка расчетов с помощью FDTD метода

Для проверки правильности расчетов по формулам Ричардса-Вольфа было дополнительно сделано моделирование методом FDTD. Рассматривалась фокусировка линейно-поляризованной плоской волны ($\lambda = 0,633$ мкм) зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием $f = 0,5$ мкм и диаметром 7,9 мкм. Числовая апертура такой линзы $NA = 0,99$. Моделирование фокусировки осуществлялось с помощью метода FDTD, реализованного в ПО FullWave. Моделирование с помощью FDTD метода подтверждает результаты, полученные с помощью формул Ричардса-Вольфа.

Заключение

В данной работе теоретически с помощью уравнений Ричардса-Вольфа было показано, что при острой фокусировке света с линейной поляризацией в плоскостях до и после фокуса имеют место области, в которых свет имеет эллиптическую поляризацию. Причем после прохождения фокуса в этих областях направление вращения вектора поляризации меняется на противоположное.

Литература

- [1] Richards B., et. al. Electromagnetic Diffraction in Optical Systems, Structure of the Image Field in an Aplanatic System // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences. – 1959. – V. 253. – P. 358–379.
- [2] Yuan G.H., et. al. Nondiffracting transversally polarized beam // Optics Letters. 2011. V. 36. P. 3479.
- [3] Ping C.L., et. al. Radially polarized multi-Gaussian Schell-model beam and its tight focusing properties // Optics Express. – 2017. – V. 25. – P. 32475–32490.
- [4] Grosjean T., et. al. Longitudinally polarized electric and magnetic optical nano-needles of ultra high lengths // Optics Communications. – 2013. – V.294. – P. 333–337.
- [5] Lin J., et. al. Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system // Optics Communications. – 2015. – V. 340. – P. 69–73.
- [6] Zhuang J., et. al. Tight-focusing properties of linearly polarized circular Airy Gaussian vortex beam // Optics Letters. – 2020. – V. 45. – P. 296.

УДК 535.42, 535.214

**ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЛЕПЕСТКОВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВРАЩЕНИЕМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ В ЗАДАЧАХ ОПТИЧЕСКОЙ
МАНИПУЛЯЦИИ**

**Дарья Владимировна Прокопова, Николай Николаевич Лосевский,
Александра Михайловна Майорова, Светлана Павловна Котова**

Физический институт академии наук им. П.Н. Лебедева, Самарский филиал, г. Самара, Россия

Аннотация

Рассматривается применение вращающихся двухлепестковых световых полей, полученных на основе оптики спиральных пучков света, в задачах оптической манипуляции. С помощью итерационной процедуры, используя в качестве начального приближения распределение фазы спирального пучка, рассчитано распределение фазовой задержки дифракционного оптического элемента. Эксперименты по оптической манипуляции проводились на установке лазерного пинцета, для формирования двухлепестковых световых полей использовался жидкокристаллический пространственный модулятор света. Продемонстрирован управляемый поворот латексных микросфер, взвешенных в воде и изменение расстояния между ними, проведена оценка предельной скорости удержания частицы в ловушке. Полученная двухлепестковая ловушка может использоваться в оптической манипуляции при проведении сборки или разделения частей микроконструкций

Ключевые слова

Оптические ловушки, оптический пинцет, двухлепестковые световые поля, вихревые пучки, спиральные пучки света

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 19–32–90078 Аспиранты и № 20–02–00671 А)

**APPLICATION OF TWO-LOBE LIGHT FIELDS WITH ROTATION OF THE
INTENSITY DISTRIBUTION FOR OPTICAL MANIPULATION**

Darya V. Prokopova, Nikolay N. Losevsky, Alexandra M. Mayorova, Svetlana P. Kotova
Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Samara, Russia

Abstract

The application of rotating two-lobe light fields, obtained on the basis of the optics of spiral light beams, in problems of optical manipulation is considered. Using an iterative procedure and the phase distribution of the spiral beam as an initial approximation, the distribution of the phase delay of a diffractive optical element is calculated. Experiments on optical manipulation were carried out on a laser tweezer setup; a liquid-crystal spatial light modulator was used to form two-lobe light fields. A controlled rotation of latex microspheres suspended in water and a change of the distance between them are demonstrated. An estimate is made of the limiting velocity of keeping a particle in a trap. The resulting two-lobe trap can be used in optical manipulation when assembling or separating parts of microstructures

Keywords

Optical traps, optical tweezers, two-lobe light fields, vortex beams, spiral light beams

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project numbers 19-32-90078 and 20-02-00671

Введение

Световые поля с заданной конфигурацией интенсивности, фазы, поляризации нашли применение в различных направлениях исследований. Одно из них – увеличение возможностей оптического пинцета, открытого в 1970 году А. Эшкиным [1] и нашедшего множество приложений в коллоидной физике, биологии и биомедицине [2]. Также структурированные световые поля нашли свое применение при создании 3D наноскопов [3] – систем, позволяющих по модифицированному флуоресцентному изображению определять трехмерное положение излучающей точки с субдифракционной точностью ~10 нм. В последнее время наблюдается интерес к формированию двухпучковых ловушек за счет

использования структурированных световых полей [4]. В настоящей статье исследуются возможности использования полученных нами ДОЭ в схемах оптических пинцетов.

Эксперимент

Эксперименты по оптической манипуляции микрообъектами при помощи двухлепестковых световых полей проводились на установке лазерного пинцета. В качестве источника излучения использовался DPSS лазер с $\lambda=532$ нм, $P=2-50$ мВт. Двухлепестковое световое поле генерировалось с помощью фазового ПМС Holoeye Pluto NIR. При фокусировке светового поля микрообъективом с высокой числовой апертурой формировались оптические ловушки. Проведены эксперименты по взаимодействию сформированного светового поля с ансамблем взвешенных в воде микросфер латекса с диаметром 2,9 мкм.

Обсуждение результатов

Используя двухлепестковое поле, возможно одновременно захватить две микросферы и повернуть их вокруг общего центра на 45° . После захвата двух микросфер двумя «лепестками» сформированного распределения интенсивности производилась перефокусировка распределения вдоль оси Z за счет введения дополнительной сферической линзы на ПМС. При этом происходит контролируемый поворот распределения интенсивности вокруг оптической оси и, соответственно, контролируемый поворот вокруг оси удерживаемых ловушкой микросфер. При повороте распределения интенсивности изменяется расстояние между максимумами в распределении интенсивности и, как следствие, захваченными частицами. Расстояние между центрами частиц меняется от 12,5 мкм до 4 мкм. Следовательно, двухлепестковое световое поле может быть полезно для оптической манипуляции при проведении сборки или разделения частей микроконструкций. Для определения максимальной скорости, с которой можно вращать две частицы, были проведены эксперименты по оценке жесткости ловушки.

Заключение

Представлены результаты по использованию в качестве оптической ловушки двухлепесткового поля. Показано, что можно реализовать поворот захваченных частиц на 45° и изменить расстояние между их центрами от 4 до 12,5 мкм. Оценена жесткость сформированной ловушки. Полученные результаты могут быть полезны в оптической манипуляции при сборке или разделении частей микроконструкций.

Литература

- [1] Ashkin A. et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles //Optics letters. – 1986. – V. 11. – Is. 5. – P. 288-290.
- [2] Cheng K. et al. Active microparticle manipulation: Recent advances //Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – V. 322. – P. 112616.
- [3] Von Diezmann A., Shechtman Y., Moerner W.E., Three-dimensional localization of single molecules for super-resolution imaging and single-particle tracking //Chemical reviews. – 2017. – V. 117. – Is. 11. – P. 7244-7275.
- [4] Shahabadi V., Madadi E. Effective multiple optical trapping of sub-micrometer particles with petal beams //JOSA B. – 2020. – V. 37. – Is. 12. – P. 3665-3671.

УДК 517.9

КВАДРАТИЧНЫЕ ПУЧКИ БЕССЕЛЯ-ГАУССА И РАЗЛОЖЕНИЕ АСТИГМАТИЧЕСКОГО ГАУССОВА ПУЧКА В РЯД ФУРЬЕ ПО УГЛОВОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

Александр Борисович Плаченев*, Алексей Прохорович Киселев**

*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

**Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа связи между пучками Бесселя-Гаусса с квадратичной радиальной зависимостью и астигматическими гауссовыми пучками. Предложено альтернативное представление для квадратичных пучков Бесселя-Гаусса. Установлено, что при разложении астигматического гауссова пучка в ряд Фурье по угловой переменной члены разложения представляют собой квадратичные пучки Гаусса-Бесселя с чётными индексами

Ключевые слова

Локализованные волны, астигматические гауссовы пучки, квадратичные пучки Бесселя-Гаусса

Благодарности

Работа выполнена при участии профессора Педро Чаморро-Посады

QUADRATIC BESSEL-GAUSSIAN BEAMS AND FOURIER DECOMPOSITION OF ASTIGMATIC GAUSSIAN BEAM WITH RESPECT TO POLAR AZIMUTHAL ANGLE

Alexandr B. Plachenov, Aleksei P. Kiselev

*MIREA–Russian Technological University, Moscow, Russia

**St. Petersburg Department of V.A. Steklov Mathematical Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract

We report an analysis of the relationship between Bessel-modulated Gaussian beams with quadratic radial dependence and astigmatic Gaussian beams. The alternative representation of quadratic Bessel-Gaussian beams is proposed. It is established that terms of the Fourier decomposition of the astigmatic Gaussian beam with respect to polar azimuthal angle are quadratic Bessel-Gaussian beams with even indices

Keywords

Localized waves, astigmatic Gaussian beams, quadratic Bessel-Gaussian beams

Acknowledgements

This work performed with the participation of the professor Pedro Chamorro-Posada

Введение

Пучки Бесселя-Гаусса с квадратичной радиальной зависимостью, построенные Кэрроном и Потлиджем [1], или, кратко, квадратичные Бессель-Гауссовы пучки, являются решениями параболического уравнения

$$2ikU_z + \Delta_{\perp}U = 0,$$

имеющими в цилиндрических координатах вид

$$U_m^Q = E_m \frac{w_0}{W(z-z_0)} \exp \left[- \left(1 + i(\mu^2 + 1) \frac{z-z_0}{z_R} \right) \frac{\rho^2}{W^2(z-z_0)} \right] \times \\ \times J_{|m|/2} \left(\frac{\mu \rho^2}{W^2(z-z_0)} \right) \frac{w_0}{W(z-z_0)} \exp(im\phi), \quad (1)$$

где

$$W(z-z_0) = w_0 \sqrt{1 - (\mu^2 + 1) \left(\frac{z-z_0}{z_R} \right)^2 + 2i \frac{z-z_0}{z_R}},$$

z_0, w_0 и $z_R = \frac{kw_0^2}{2}$ – вещественные, а E_m и μ – комплексные параметры, причём $|Im\mu| < 1$.

Такие пучки имеют общие черты с линейными Бессель-Гауссовыми пучками, но в некоторых отношениях заметно от них отличаются. Пучки обоих типов порядка m имеют одинаковую зависимость от угловой переменной и, в частности, описывают оптические вихри с топологическим зарядом m , расположенные на оптической оси, и связанный с ними угловой оптический момент. Линейные Бессель-Гауссовы пучки представляет собой члены разложения в ряд Фурье наклонного гауссова пучка [2]. Мы обнаружили, что квадратичные пучки тесно связаны с астигматическими гауссовыми пучками. В частности, квадратичные Бессель-Гауссовы пучки с чётными индексами являются членами разложения в ряд Фурье астигматического пучка.

Основные результаты

Нами предложена альтернативная форма представления функции (1), имеющая вид

$$U_m^Q = \frac{C_m}{\sqrt{q_1(z)q_2(z)}} \exp \left[ik \frac{q_1^{-1}(z)+q_2^{-1}(z)}{4} \rho^2 \right] J_{|m|/2} \left(k \frac{q_1^{-1}(z)-q_2^{-1}(z)}{4} \rho^2 \right) \exp(im\phi), \quad (2)$$

где

$$q_{1,2}(z) = z - z_{1,2} - ib_{1,2},$$

при этом C_m – комплексные, а $z_{1,2}$ и $b_{1,2} > 0$ – вещественные параметры, связанные с параметрами z_0, z_R и μ :

$$z_1 + ib_1 = z_0 - \frac{z_R}{i + \mu}, \quad z_2 + ib_2 = z_0 - \frac{z_R}{i - \mu}.$$

Представление (2) связано с выражением для гауссова пучка с простым астигматизмом – решения параболического уравнения, имеющего вид

$$U^A = \frac{C}{\sqrt{q_1(z)q_2(z)}} \exp \left[ik \left(\frac{x^2}{q_1(z)} + \frac{y^2}{q_2(z)} \right) \right].$$

Нами установлено, что

$$U^A = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_{2n}^Q,$$

при этом $C_{2n} = C i^n \epsilon_n$, где $\epsilon_n = 1$ при $n \geq 0$ и $\epsilon_n = (-1)^n$ при $n < 0$.

Пусть теперь U^R – решение параболического уравнения, получающееся из U^A поворотом на угол Φ относительно оптической оси z . Оно представляется в виде ряда

$$U^R = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_{2n}^Q e^{-2in\Phi}.$$

Если допустить не вещественные значения Φ , мы приходим к вращающимся гауссовым пучкам. Тогда коэффициенты $e^{-2in\Phi}$ для положительных и отрицательных значений n различаются по модулю, что приводит к появлению ненулевого углового оптического момента. Подробное изложение результатов работы можно найти в статье [3].

Литература

- [1] Caron C. F. R., Potvliege R. M. Bessel-modulated Gaussian beams with quadratic radial dependence // Optics communications. – 1999. – V. 164. – Is. 1-3. – P. 83-93.
 [2] Bagini V. et al. Generalized bessel-gauss beams // Journal of modern optics. – 1996. – V. 43. – Is. 6. – P. 1155-1166.
 [3] Plachenov A. B., Chamorro-Posada P., Kiselev A. P. Quadratic Bessel-Gauss beams and the azimuthal angular spectra of Gaussian astigmatic beams // Physical Review A. – 2020. – V. 102. – Is. 2. – P. 023533.

УДК 537.876.22

ПРОСТЫЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ МАЛОЦИКЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИМПУЛЬСЫ

Ирина Александровна Со*, Александр Борисович Плаченнов*, Алексей Прохорович Киселев**

*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

**Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Представлено семейство явных простых малоцикловых электромагнитных импульсов с конечной энергией, у которых отсутствует компонента, распространяющаяся в обратном направлении. Импульсы являются точными решениями уравнений Максвелла для изотропной среды. Математический формализм совершенно элементарен и основан на построении векторного потенциала Герца с использованием ранее найденного авторами осесимметричного решения линейного волнового уравнения

Ключевые слова

Локализованные волны, явные аналитические решения, блинообразные импульсы, шароподобные импульсы, иглообразные импульсы, тороидальные импульсы

Благодарности

Мы признательны С.А. Козлову и Н.В. Петрову за стимулирующие обсуждения

SIMPLE UNIDIRECTIONAL FEW-CYCLE ELECTROMAGNETIC PULSES

Irina A. So, Alexandr B. Plachenov, Aleksei P. Kiselev

*MIREA–Russian Technological University, Moscow, Russia

**St. Petersburg Department of V.A. Steklov Mathematical Institute, St. Petersburg, Russia

Abstract

A family of explicit simple few-cycle electromagnetic pulses with finite energy which are free of backward propagating components is described. The pulses are exact solutions of Maxwell's equations for isotropic media. The mathematical framework is elementary and comprises using Hertz's vector potential based on the axisymmetric exact solution of the linear wave equation, which was presented earlier by the authors

Keywords

Localized waves, closed-form solutions, pancake pulses, ball pulses, needle pulses, doughnut pulses

Acknowledgements

We are indebted to S.A. Kozlov and N.V. Petrov for stimulating discussions

Введение

Как известно, электромагнитные импульсы, исходящие от источника электромагнитного поля, не содержат обратно распространяющихся компонент. Однако почти все известные точные решения волнового уравнения, обладающие конечной энергией, не являются однонаправленными, а однонаправленные решения с конечной энергией [1] очень сложны. Они были получены путем удачного подбора весовой функции в разложении решения по Бесселевым пучкам.

В работе представлены малоцикловые решения уравнений Максвелла, которые имеют конечную энергию и являются однонаправленными, то есть не содержат обратно распространяющихся компонент. В отличие от ранее известных решений, описанные здесь решения имеют простой аналитический вид.

Основные результаты

Мы описываем электромагнитное поле, полученное посредством потенциала Герца [2] на основе точного решения волнового уравнения [3, 4]

$$u = \frac{1}{s(z_* - s)}, \tag{1}$$

где $S = \sqrt{c^2 t_*^2 - x^2 - y^2}$, $z_* = z + i\zeta$, $t_* = t + i\tau$, ζ и τ – свободные постоянные параметры, подчиненные условию $\zeta/\tau < c$. Ветвь корня выбрана так, что $S|_{x=0, y=0} = ct_*$. Известный сплэш-импульс [5] является разностью двух решений такого рода. Решение (1) и соответственно компоненты электромагнитного поля однонаправлены вдоль оси z . Как показано в [6], их разложения по плоским волнам содержат только такие плоские волны, направления которых имеют положительные проекции на ось z .

Выбрав в качестве потенциала Герца

$$u = (\int u dt, 0, 0), \tag{2}$$

получим для напряжённости электрического поля $E = \left(0, \frac{1}{s(z_* - s)^2}, \frac{y(z_* - 2S)}{s^3(z_* - s)^2}\right)$, а для

$$u = (0, 0, \int u dt) \tag{3}$$

приходим к $E = \left(\frac{y(z_* - 2S)}{s^3(z_* - s)^2}, -\frac{x(z_* - 2S)}{s^3(z_* - s)^2}, 0\right)$.

При разных соотношениях между параметрами ζ и τ можно получить различные формы импульсов (как показано на рисунке). В случае (2) $\zeta \approx \tau$ соответствует блинообразным импульсам, $|\zeta| \ll \tau$ – шароподобным, $|\zeta| \gg \tau$ – иглообразным. Случай (3) соответствует тороидальным импульсам.

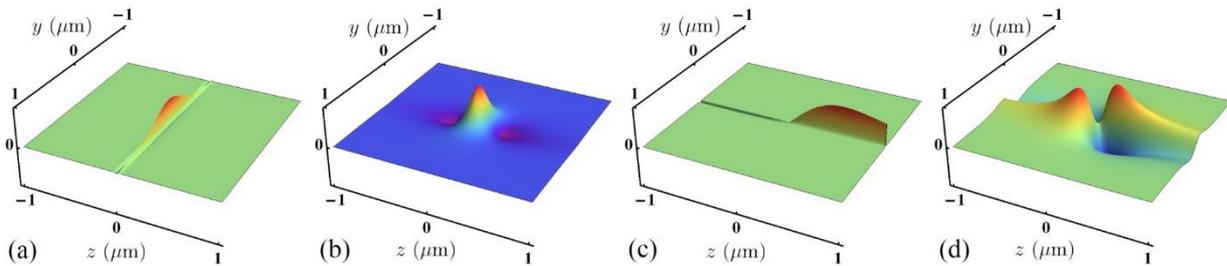


Рисунок. Поперечные компоненты электрического поля (a) блинообразных, (b) шароподобных, (c) иглообразных и (d) тороидальных импульсов, соответствующие (b), (d) реальной и (a), (c) мнимой частям комплексного волнового поля. Импульсы (a, b, c) построены для потенциала (2), а импульс (d) – для (3)

Литература

[1] Lekner J. Electromagnetic pulses, localized and causal //Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2018. – V. 474. – Is. 2209. – P. 20170655.
 [2] Zangwill A., Modern Electrodynamics. NY: Cambridge University Press, 2012. 998 p.
 [3] Со И.А., Плаченев А.Б., Киселев А.П. Однонаправленные одноцикловые и субцикловые импульсы //Опт. и спектр. – 2020. – Т. 128. – №. 12. – С. 1865.
 [4] So I.A., Plachenov A.B., Kiselev A. P. Simple unidirectional finite-energy pulses //Physical Review A. – 2020. – V. 102. – Is. 6. – P. 063529.
 [5] Feng S., Winful H.G., Hellwarth R.W. Spatiotemporal evolution of focused single-cycle electromagnetic pulses //Physical Review E. – 1999. – V. 59. – Is. 4. – P. 4630.
 [6] Плаченев А.Б. Выражение энергии акустического, электромагнитного и упругого волнового поля через его асимптотику на больших временах и расстояниях //Записки научных семинаров ПОМИ. – 2020. – Т. 493. – С. 269–287.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ И ФОТониКИ

УДК 616.12-073

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНЫХ ПЛАЗМОН АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗОЛОТЫМИ НАНОЗВЕЗДАМИ

Андрей Юрьевич Зюбин, Игорь Игоревич Кон, Анна Анатольевна Кундалевич,
Елизавета Александровна Демишкевич, Александр Сергеевич Зозуля, Денис Олегович Евтифеев,
Илья Геннадьевич Самусев

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация

В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований планарных оптических сенсоров, имеющих кварцевую основу и модифицированных золотыми нанозвездами. Выполнено математическое моделирование их оптических свойств методом конечных разностей во временной области (FDTD - Finite-Difference Time-Domain) напряжённостей электромагнитного поля вблизи поверхностей структуры. Была выполнена оценка коэффициента эффективного сигнала гигантского комбинационного рассеяния, достигаемого вблизи поверхности такой структуры. Экспериментально, оценивался коэффициент гигантского комбинационного рассеяния света на модельном красителе родамине 6Ж. Показана перспективность комплексного подхода к созданию новых фотонных материалов *in situ*

Ключевые слова

FDTD-моделирование, гигантское комбинационное рассеяние света, нанозвезды, золото

Благодарности

Работа поддержана в рамках проекта FZWM-2020-0003 в рамках государственного задания Минобрнауки России

OPTICAL PROPERTIES OF PLANAR PLASMON ACTIVE SURFACES MODIFIED WITH GOLD NANOSTARS

Andrey Yu. Zyubin, Igor I. Kon, Anna A. Kundalevich, Elizaveta A. Demishkevich, Alexander S. Zozulya,
Denis O. Evtifeev, Ilya G. Samusev

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract

The paper presents the results of experimental and theoretical investigations of planar optical sensors with a quartz base, modified with gold nanostars. Mathematical modeling was carried out using method of finite differences in the time domain (FDTD - Finite-Difference Time-Domain). It was used for optical parameters evaluation of the electromagnetic field enhancement near the surfaces of the structure. Also, the field values were recalculated into the SERS coefficient. Experimentally, the SERS coefficient was evaluated using the model dye rhodamine 6G. The prospects of an integrated approach to the creation of new photonic materials *in situ* is shown

Keywords

Optical radiation, absorption, scattering, modeling, biological tissues, Monte Carlo method

Введение

В настоящее время существует значительный интерес к разработке и использованию плазмонных сенсоров на базе поверхностно-функционализированных частиц золота в коллоидных растворах и на поверхностях. Коллоидные системы, в последнее время, применяются в качестве адресной доставки лекарственных средств в опухолевые ткани, которые известны своим разрастанием сосудов и высоким метаболизмом [1], в связи с чем повышенным накоплением питательных веществ. Поэтому при адресном введении наночастиц они попадают в раковые опухоли в достаточном количестве. Золотые наночастицы обладают хорошей биосовместимостью, а также наночастицы большинства размеров не являются цитотоксичными [2] и выводятся организмом [3]. Оптимальные

оптические свойства наночастиц золота для детектирования средствами спектроскопии, их легкость модификации поверхности и высокое отношение поверхности к объему сделали их основным материалом в этой области. Оптические свойства золотых наночастиц, вблизи которых может детектироваться эффект плазмонного резонанса, позволяют эффективно применять их в методах флуоресцентной и рамановской спектроскопии [4]. По результатам выполненной работы представлены результаты математического моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD - Finite-Difference Time-Domain) напряженностей электромагнитного поля вблизи поверхностей планарных поверхностей на кремниевой основе, модифицированных золотыми нанозвездами. Данные моделирования были соотнесены с экспериментальными результатами, полученными на спектрометре комбинационного рассеяния света CentaurUHR. По результатам теоретического моделирования определены оптимальные оптические и морфологические параметры для практического синтеза наночастиц и дальнейшей ГКРС съемки клеточных структур. В работе обозначены подходы теоретического моделирования оптимальных оптических и морфологических параметров планарных фотонных устройств. С учетом результатов теоретического моделирования успешно разработаны методики синтеза сфероидальных и звездообразных наночастиц (в том числе с оболочкой), исследованы их оптические, морфологические свойства. Получены экспериментальные результаты ГКРС с применением сфероидальных и звездообразных наночастиц. Получены функционализированные наночастицами поверхности – прототипы оптических сенсоров. Показано, что экспериментальный коэффициент усиления сигнала КРС может составлять не менее чем 10^4 раз.

Полученные результаты обладают несомненным потенциалом практического внедрения для задач сенсорики, биофизики и медицины, являются патентоспособными.

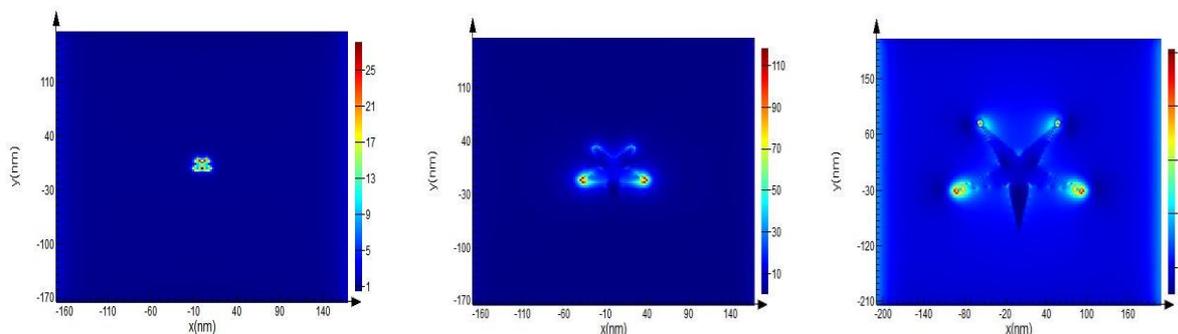


Рисунок. Распределение электромагнитного поля вблизи поверхности нанозвезд с центральным радиусом: а – 10 нм, б – 15 нм, в – 25 нм

Литература

- [1] Israël M., Schwartz L., The metabolic advantage of tumor cells //Molecular cancer. – 2011. – V. 10. – Is. 1. – P. 1-12.
- [2] Pan Y., et al. Size-dependent cytotoxicity of gold nanoparticles //Small. – 2007. – V. 3. – Is. 11. – P. 1941-1949.
- [3] Takeuchi I., et al. Biodistribution and excretion of colloidal gold nanoparticles after intravenous injection: effects of particle size //Bio-Medical Materials and Engineering. – 2017. – V. 28. – Is. 3. – P. 315-323.
- [4] Fleischmann M., Hendra P.J., McQuillan A.J., Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode //Chemical physics letters. – 1974. – V. 26. – Is. 2. – P. 163-166.

УДК 535.44

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ВОЛНЫ В СЛОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ С ЧАСТОТОЙ ВБЛИЗИ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТУ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫХОДА DD-РЕАКЦИЙ В КРИСТАЛЛЕ И СКОРОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСА СКВОЗЬ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ

Антон Александрович Крайский, Александр Владиславович Крайский
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

Аннотация

Сообщается о ранее предложенном методе описания волны, распространяющейся в слое периодической слоистой среды с частотой близкой к краю запрещенной зоны кристалла, основанном на построении теории возмущений по отстройке квазиимпульса волны от края зоны. При помощи этого метода показано, что при прохождении нерелятивистской заряженной частицы сквозь одномерный кристалл амплитуда ее волновой функции увеличивается, что соответствует экспериментам, в которых для частиц с низкой энергией выход реакций DD увеличивался по сравнению со значениями, рассчитанными с помощью экстраполяции данных из области высоких энергий. С помощью этого метода найдены и проанализированы скорость и время прохождения через фотонный кристалл спектрально узкого светового импульса

Ключевые слова

Кристаллы, край зоны, окна прозрачности, увеличение амплитуды поля, медленный свет, увеличение выхода DD-реакций, метод расчета

A METHOD FOR THE ANALYTICAL DESCRIPTION OF A WAVE IN A LAYER OF A PERIODIC LAYERED MEDIUM WITH A FREQUENCY NEAR THE BAND GAP AND ITS APPLICATION TO THE CALCULATION OF AN INCREASE IN THE YIELD OF DD REACTIONS IN A CRYSTAL AND THE SPEED OF A PULSE PASSING THROUGH A PHOTONIC CRYSTAL

Anton A. Kraiski, Aleksandr V. Kraiski

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

A previously proposed method for describing a wave propagating in a layer of a periodic layered medium with a frequency close to the band gap edge of a crystal is reported. Using this method, it is shown that when a nonrelativistic charged particle passes through a one-dimensional crystal, the amplitude of its wave function increases, which corresponds to experiments in which, for low-energy particles, the yield of DD reactions increased compared to the values calculated using extrapolation of data from the high-energy region. Using this method, the speed and time of passage of a spectrally narrow light pulse through a photonic crystal are found and analyzed

Keywords

Crystals, zone edge, transparency windows, increase in field amplitude, slow light, increase in the yield of DD reactions, calculation method

Введение

Большой интерес представляет распространение света в фотонном кристалле (ФК) с частотами, лежащими вблизи края запрещенной зоны, где наблюдаются области частот (окна прозрачности), при которых поле волны внутри ФК резко возрастает, а групповая скорость падает. Для аналитического описания этого процесса в [1] с помощью теории возмущений был разработан метод его расчета.

О методе описания волны в слое периодической слоистой среды

Считая, что отстройка энергии частицы (и, соответственно, волнового числа Δq) от края разрешенной зоны мала, в [1] для нахождения поля световой волны построена теория

возмущения по Δq . Таким образом, от двух волн Блоха с некоторой частотой был произведен переход к выражению, зависящему лишь от распределения поля с частотой, соответствующей границе разрешенной зоны от параметров кристалла и от Δq .

О волновой функции дейтрона в одномерном периодическом потенциале

Этот метод был применен для расчета волновой функции дейтрона, движущегося в кристалле. Задача возникла при объяснении увеличения экспериментально измеренного выхода DD-реакции по сравнению со значениями, полученными экстраполяцией из области высоких энергий. В [2] исследовано свыше 70 элементов периодической системы. Эффект был обнаружен в большинстве исследованных металлов. В [3] было показано, что для дейтрона увеличение амплитуды волновой функции в окне прозрачности пропорционально толщине кристалла и обратно пропорционально номеру окна, отсчитанному от запрещенной зоны. Ширина окна прозрачности пропорциональна квадрату номера окна и обратно пропорциональна кубу толщины кристалла. Расчеты по этому методу показывают, что значительный рост увеличения выхода реакции при уменьшении энергии падающей частицы действительно соответствует увеличению квадрата амплитуды волновой функции, который может составлять более 10^5 раз.

О групповой скорости светового импульса в окне прозрачности

Предложенный метод применён для нахождения групповой скорости V_{gr} и времени прохождения света τ через ФК [4]. Рассматривается время и скорость прохождения импульса через слой ФК. Рассматривался спектрально узкий импульс в диапазоне частот, центр которого совпадает с центром окна прозрачности, поскольку задержка импульса здесь максимальна. Для скорости и времени прохождения такого спектрально узкого импульса через ФК конечной толщины получены аналитические выражения, применимые при произвольном профиле диэлектрической проницаемости (ДП) на периоде фотонного кристалла. При этом V_{gr} и τ выражены через поля при квазиимпульсе q_0 , соответствующем границе запрещенной зоны. Скорость импульса пропорциональна квадрату номера ОП и обратно пропорциональна квадрату толщины кристалла. Она растет с уменьшением соответствующей Фурье-компоненты переменной части ДП, выходя на обратную квадратичную зависимость в случае малых амплитуд изменений, причем в последнем случае выражения для скорости приобретают особенно простой вид.

Литература

- [1] Крайский А.А., Крайский А.В. О свойствах окон прозрачности вблизи края запрещенной зоны одномерного фотонного кристалла //Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. – 2018. – Т. 45. – №. 2. – С. 37–46.
- [2] Raiola F. et al. Enhanced electron screening in d (d, p) t for deuterated Ta //The European Physical Journal A-Nadrons and Nuclei. – 2002. – V. 13. – Is. 3. – P. 377–382.
- [3] Крайский А.А., и др. о сильном увеличении амплитуды волновой функции массивной нерелятивистской частицы, падающей на кристалл (одномерное приближение) //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – №. 5. – С. 84–93.
- [4] Крайский А.А. и др. О резонансном увеличении поля внутри фотонного кристалла в окнах прозрачности вблизи запрещенной зоны и некоторых его применениях //Фотоника. – 2018. – Т. 12. – №. 8. – С. 802–822.

УДК 538.911

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДЕФЕКТОВ И ЭКСИТОНОВ В ПЛЕНКАХ Y_2O_3 С МОНОКЛИННОЙ СТРУКТУРОЙ

Юлия Алексеевна Кузнецова, Дмитрий Анатольевич Зацепин, Анатолий Федорович Зацепин,
Николай Васильевич Гаврилов

Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

В работе представлены комплексные исследования оптических свойств пленки Y_2O_3 с моноклинной структурой, полученной методом магнетронного распыления. Параметры зонной энергетической структуры и эмиссионные характеристики пленки определены методами спектроскопии поглощения, пропускания и фотолюминесценции. Установлена дисперсия показателя преломления и определены значения щелей прозрачности для прямых и непрямых межзонных переходов. Обнаружены оптически активные собственные дефекты вакансионного (F - центры) и межузельного типа (O_i - центры), характеризующиеся распределением излучательных состояний по энергии активации тушения свечения. Люминесценция в УФ и видимом спектральных диапазонах интерпретирована как триплетные излучательные переходы в автолокализованном и связанном экситонах. Определены значения термоактивационных барьеров для разгорания и тушения свечения экситонов и предложена схема системы соответствующих конфигурационных кривых

Ключевые слова

Тонкие пленки, оксид иттрия, показатель преломления, люминесценция, собственные дефекты, экситоны

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект #21-12-00392

LUMINESCENCE OF INTRINSIC DEFECTS AND EXCITONS IN Y_2O_3 FILMS WITH A MONOCLINIC STRUCTURE

Yulia A. Kuznetsova, Dmitry A. Zatsepin, Anatoly F. Zatsepin, Nikolay V. Gavrilov

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract

This work presents a comprehensive study of the optical properties of Y_2O_3 film with a monoclinic structure obtained by magnetron sputtering. The parameters of the band energy structure and the emission characteristics of the film were determined by absorption, transmission, and photoluminescence spectroscopy. The dispersion of the refractive index is established and the values of the transparency gaps for direct and indirect interband transitions are determined. Optically active intrinsic defects of the vacancy (F - centers) and interstitial type (O_i - centers) were found, which are characterized by the distribution of radiative states over the activation energy of emission quenching. Luminescence in the UV and visible spectral ranges is interpreted as triplet radiative transitions in self-trapped and bound excitons. The values of thermally activated barriers for flare up and quenching of excitons luminescence are determined, and a scheme of the system of corresponding configuration curves is proposed

Keywords

Thin films, yttrium oxide, refractive index, luminescence, intrinsic defects, excitons

Acknowledgements

Financial support from Russian Science Foundation under the grant #2 1-12-00392 is gratefully acknowledged

Введение

Тонкие пленки на основе оксидов редкоземельных элементов представляют собой перспективный класс многофункциональных материалов для фотоники, микро-, нано-, оптоэлектроники и альтернативной энергетики. Одним из активно исследуемых материалов данного типа является оксид иттрия, который имеет несколько полиморфных модификаций: кубическую, моноклинную и гексагональную [1]. Большинство исследований посвящено кубической модификации Y_2O_3 , поскольку она является наиболее стабильной фазой при комнатной температуре и атмосферном давлении [2]. Вместе с тем

работы по изучению оптических свойств моноклинного полиморфа практически отсутствуют ввиду сложности синтеза однофазного Y_2O_3 с данным типом структуры.

В настоящей работе выполнены комплексные исследования фундаментальных оптических характеристик и люминесцентных свойств пленки Y_2O_3 с моноклинной структурой. Полученная информация обеспечит необходимый задел для дальнейшего изучения тонкопленочных материалов на основе моноклинной модификации Y_2O_3 .

Образцы и методы

Пленка Y_2O_3 толщиной 450 нм на подложке кварцевого стекла получена методом высокочастотного (13.56 МГц) магнетронного распыления. Структурно-фазовый анализ, выполненный методом рентгеновской дифракции, показал, что пленка Y_2O_3 однофазна и характеризуется моноклинной модификацией кристаллической структуры. Средний размер кристаллитов составил 13 нм. Исследование элементного состава пленки выполнено методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS).

Результаты и заключение

На основе анализа интерференционных эффектов, наблюдаемых в спектре оптического пропускания, определена дисперсия показателя преломления пленки Y_2O_3 . Установлено, что пленка с моноклинной структурой характеризуется пониженным показателем преломления по сравнению с кубической модификацией Y_2O_3 . Данная особенность объясняется низкой плотностью упаковки исследуемой моноклинной пленки по сравнению с кубическими аналогами, что обусловлено технологическими особенностями синтеза.

Параметры зонной структуры Y_2O_3 определены методом оптической спектроскопии поглощения. Анализ Урбаховского края поглощения показал высокую степень структурного атомного беспорядка в исследуемой пленке. Из анализа края фундаментального поглощения определены значения щелей прозрачности для прямых и непрямых межзонных переходов, которые составляют 6.1 эВ и 5.3 эВ, соответственно.

Люминесценция в УФ-диапазоне спектра связана с оптически активными дефектами вакансионного типа (F - центры) и межузельного типа (O_i - центры). Температурные зависимости свечения не описываются классическим законом тушения. Причина нетипичного температурного поведения люминесценции заключается в распределении плотности излучательных состояний по энергии активации тушения.

Обнаружены два типа экситонов (автолокализованный и связанный), характеризующихся триплетными излучательными переходами в УФ и видимом спектральных диапазонах. Температурные зависимости люминесценции экситонов включают стадии разгорания и тушения. Определены значения соответствующих термоактивационных барьеров. Предложена схема системы конфигурационных кривых для автолокализованного и связанного экситонов.

Литература

- [1] Wiktorczyk T., Biegański P., Serafińczuk J. Optical properties of nanocrystalline Y_2O_3 thin films grown on quartz substrates by electron beam deposition //Optical Materials. – 2016. – V. 59. – P. 150-156.
- [2] Yu P. et al. Oxygen vacancies dependent phase transition of Y_2O_3 films //Applied Surface Science. – 2017. – T. 410. – С. 470-478.

УДК 535.8

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Александр Дмитриевич Безпалый, Виталий Иванович Быков, Аркадий Евсеевич Мандель

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования характеристик волноводных структур, формируемых в кристалле ниобата лития с поверхностным легированием. Формирование волноводных структур осуществлялось за счет поточечного индуцирования изменений показателя преломления экспериментального образца при различных условиях экспонирования поверхностного слоя лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Полученные структуры исследовались при помощи экспериментальной установки на основе схемы интерферометра Жамена

Ключевые слова

Оптический волновод, ниобат лития, поверхностный слой, изменения показателя преломления, интерферометр Жамена

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (проект Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8)

OPTICAL WAVEGUIDE STRUCTURES INDUCED IN A SURFACE-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

Alexander D. Bezpaly, Vitaliy I. Bykov, Arkadiy E. Mandel

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract

We present the investigation results of optically induced waveguide structures characteristics. Waveguide structures were formed by point-by-point inducing their refractive index changes of the experimental sample via various exposure conditions of the surface layer by laser radiation with a wavelength of $\lambda = 532$ nm. The formed waveguide structures were studied by using an experimental setup based on a Jamin interferometer scheme

Keywords

Optical waveguide, lithium niobate, surface layer, refractive index changes, Jamin interferometer

Acknowledgements

The work was carried out as part of implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (project Pr2030-Nauka SCH/SP1/B/8)

Введение

Оптические волноводы являются фундаментальными элементами при построении различных оптоэлектронных устройств и интегрально-оптических схем [1]. В качестве подложки для таких устройств используются различные материалы с широким спектром физических и оптических свойств, одним из которых является ниобата лития [1, 2]. При локальном освещении отдельных участков кристаллического образца LiNbO_3 можно изменять показатель преломления кристалла с перестраиваемой периодичностью [3]. Это позволяет формировать волноводные структуры с различными характеристиками и изменять их топологию в процессе формирования.

Формирование волноводных структур и исследование характеристик

Формирование волноводных структур проводилось путем индуцирования изменений показателя преломления в поверхностном слое кристаллического образца $\text{LiNbO}_3:\text{CuX}$ -среза

размеров $14 \times 10 \times 1.25$ мм³. В качестве источника излучения использовался твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер, работающий в непрерывном режиме с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм). Экспериментальный образец размещался на микрометрическом позиционере с точностью перемещения 5 мкм. Световой пучок фокусировался на поверхность образца микрообъективом. Диаметр светового пучка составлял ~ 50 мкм по уровню $1/e^2$ от максимального уровня интенсивности. Поляризация лазерного излучения соответствовала необыкновенной волне кристалла. Плотность мощности световой волны составляла ~ 500 Вт/см². Время экспонирования поверхностного слоя одним фокусированным световым пятном в разных экспериментах изменялось от 2 до 60 секунд. Путем локальной засветки отдельных участков кристалла создавались области в виде прямых полос с измененным показателем преломления. Каждая область состояла из набора точек, расположенных на расстоянии 25 мкм друг от друга. Расстояние между полосками в экспериментах изменялось от 120 до 60 мкм.

Исследования характеристик волноводных структур, формируемых за счет изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностном слое ниобата лития, проводились путем анализа интерференционных картин, образованных излучением He-Ne лазера ($\lambda = 633$ нм). Исследуемый образец размещался в одном из плеч интерферометра Жамена. Источником излучения являлся He-Ne лазер с поляризацией световой волны, параллельной оптической оси кристалла. Выходная мощность He-Ne лазера составляла ~ 1 мВт.

Визуализация индуцированных изменений показателя преломления в экспонированных областях поверхностного слоя осуществлялась путем обработки полученных интерферограмм в программе для ЭВМ «Визуализатор волнового фронта» [4]. Значения изменений показателя преломления Δn_e поверхностного слоя вдоль оси Z при разном времени экспонирования рассчитывались с учетом глубины индуцированных изменений показателя преломления вдоль оси X кристалла. Результаты экспериментов показали, что при изменении времени экспонирования появляется возможность влиять на величину показателя преломления волноводной области в пределах от 1×10^{-4} до 10×10^{-4} .

Заключение

Экспериментально исследованы характеристики волноводных структур, формируемых за счет индуцированных изменений показателя преломления в кристалле ниобата лития с поверхностным легированием. Показано, что величину индуцированных изменений показателя преломления можно регулировать, изменяя длительность экспонирования кристалла. Пространственный профиль индуцированных изменений в локально освещенной области имеет знакопеременный характер. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании и проектировании интегрально-оптических схем, гибридных и полностью оптических устройств.

Литература

- [1] Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Applied Physics Reviews. – 2015. – V. 2. – Is. 4. – P. 040603.
- [2] Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В., Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 315 с.
- [3] Horn W. et al. Electro-optical tunable waveguide Bragg gratings in lithium niobate induced by femtosecond laser writing // Optics express. – 2012. – V. 20. – Is. 24. – P. 26922-26928.
- [4] Безпалый А.Д., и др. Визуализатор волнового фронта: свид. 2021661646 РФ. №2021660493/69; заявл. 07.07.2021; опубл. 14.07.2021, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

УДК 535

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОЦЕССА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО
ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ
СТРУКТУР В КПЖК**

Виктор Олегович Долгирев, Сергей Николаевич Шарангович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация

В работе представлено исследование процесса формирования многослойных неоднородных голографических дифракционных структур (МНГДС) в капсулированных полимером жидких кристаллах (КПЖК) в условиях нелинейного режима записи и с учетом фотоиндуцированного оптического поглощения (ФИП) материала. Численным моделированием показана трансформация амплитудных пространственных профилей первой гармоники показателя преломления для каждого слоя трехслойной голографической дифракционной структуры в процессе их записи

Ключевые слова

МНГДС, КПЖК, голографическое формирование, ФИП

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

**MODELING OF THE NONLINEAR PROCESS OF HOLOGRAPHIC FORMATION OF
MULTILAYER INHOMOGENEOUS DIFFRACTION STRUCTURES IN PDLC**

Victor O. Dolgirev, Sergey N. Sharangovich

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract

The paper presents research of the process of formation of multilayer inhomogeneous holographic diffraction structures (MIHDS) in polymer-dispersed liquid crystals (PDLC) under nonlinear recording conditions and taking into account photoinduced optical absorption (PIA) of the material. Numerical modeling shows the transformation of the amplitude spatial profiles of the first harmonic of the refractive index for each layer of a three-layer holographic diffraction structure during their recording

Keywords

MIHDS, PDLC, holographic formation, PIA

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority-2030"

Введение

Большой интерес к исследованию МНГДС вызван возможностью их применения в области оптической системы связи. Это обусловлено тем, что селективный отклик таких структур представляет из себя набор локальных максимумов, зависящий от толщины дифракционного и промежуточного слоя, а также их количества. На основе дифракционных свойств МНГДС, например, можно реализовать спектральную фильтрацию проходящего светового излучения, что может найти применение в качестве WDM мультиплексоров [1].

Как было показано ранее в работе [2] при формировании МНГДС в КПЖК с учетом ФИП профили решеток могут трансформироваться во время записи. При этом, при разном соотношении времени полимеризации к времени диффузии профили решеток могут иметь значительную неоднородность, вследствие формирования различного гармонического состава формируемой структуры в каждом слое. А неоднородность профилей по глубине слоев может приводить к искажению дифракционных характеристик [1].

Таким образом, актуальной задачей является исследование процесса формирования МНГДС в КПЖК в условиях нелинейного режима записи.

Теоретическая модель формирования МНГДС в КПЖК

В данной работе рассматривается запись на структурах, содержащих капсулированные полимером нематические ЖК, для которых характерно объединение ЖК в капсулы. В общем случае процесс формирования каждого отдельного слоя МНГДС в КПЖК описывается с помощью кинетических уравнений фотополимеризационного и диффузионного механизма записи. Решение данных уравнений относительно амплитуды первой гармоники показателя преломления было описано в работе [2]:

$$n_1^{n,e}(t, y) = n_{1p}^{n,e}(t, y) + n_{1d}^{n,e}(t, y), \quad (1)$$

где $n_{1p}^{n,e}(t, y)$ и $n_{1d}^{n,e}(t, y)$ – амплитудные профили для полимерной и диффузионной составляющей, n – номер слоя, y – ось вдоль толщины слоев.

Численный расчет

Используя выражение (1), были численно рассчитаны пространственные амплитудные профили (рисунок) первой гармоники показателя преломления для трехслойной структуры, записанные пучками с поляризацией, совпадающими с необыкновенными собственными волнами в образце.

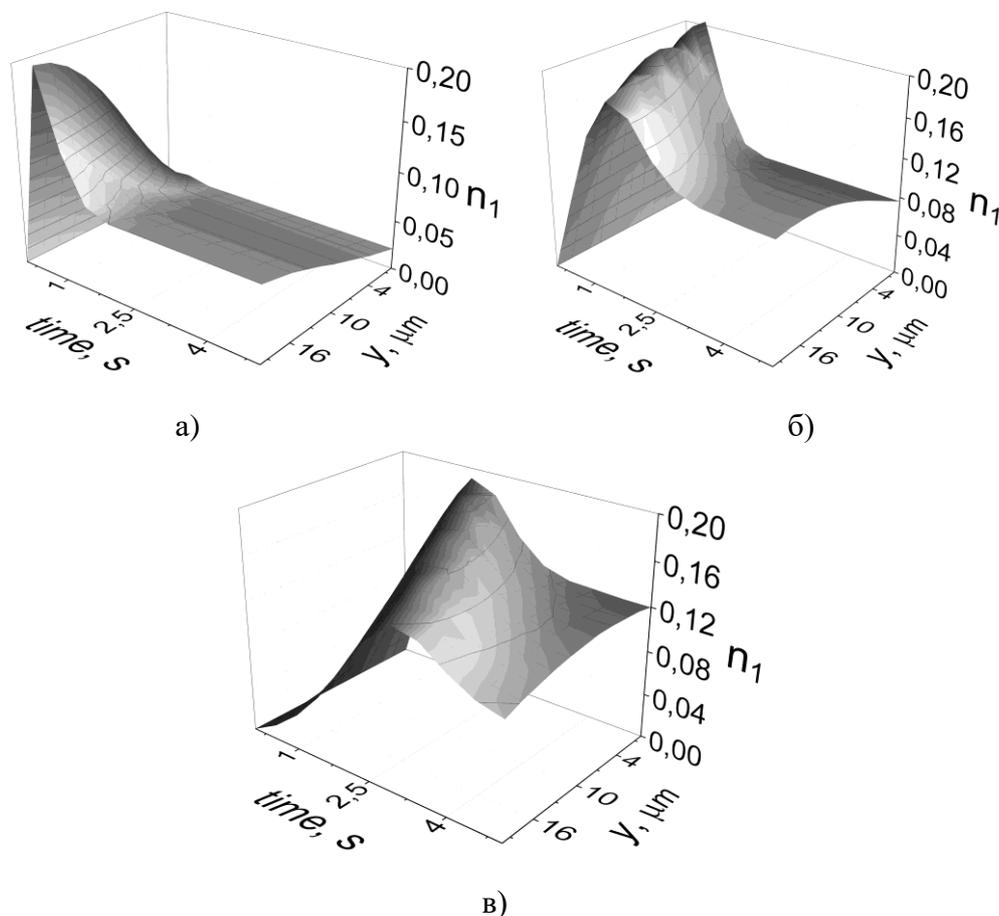


Рисунок. Амплитудные профили первой гармоники показателя преломления для (а) 1-го, (б) 2-го и (в) 3-го слоя

Для расчета использовались следующие параметры: $d = 20$ мкм – толщина КПЖК слоя, $2\theta = 10^0$ – угол между записывающими пучками, $\delta n_p = 0.003$, $\delta n_d = 0.0003$, $b = 0.1$ – соотношение времени полимеризации к времени диффузии, $\alpha_2 = 0.096$ Нп/мкм – коэффициент поглощения материала, $\alpha_1 = 10^{-4}$ Нп/мкм – коэффициент поглощения подложки, $D_m = D_{LC} = 10^{-15}$ м²/с – коэффициент диффузии мономера и ЖК, $\lambda = 633$ нм – длина волны.

Как видно из рисунка, профили решеток претерпевают существенные изменения в процессе записи. При этом вид профиля для каждого слоя различен, что обусловлено влиянием ФИП на процесс их формирования. Также заметно снижение амплитуды на стационарном режиме, что говорит о том, что мономера остается мало и процесс полимеризации затягивается. Вместе с тем снижение коэффициента поглощения материала приведет к еще большему снижению амплитуды для последующих слоев.

Заключение

В результате исследования процесса формирования МНГДС в КПЖК в условиях нелинейного режима записи, с помощью численного моделирования было продемонстрировано, что профили решеток могут трансформироваться с течением времени и их вид по глубине слоев различен вследствие просветления материала. Таким образом, формирование МНГДС в нелинейном режиме записи может привести к ухудшению дифракционных характеристик, вследствие сильной неоднородности профилей решеток.

Литература

- [1] Sharangovich S.N., Dudnik D.I. Interaction between Light and Transmission Multi-Layered Heterogeneous Photopolymer Holographic Diffraction Structures //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2021. – V. 85. – Is. 1. – P. 8-14.
- [2] Dolgirev V., Sharangovich S. Holographic formation of multilayer nonuniform PPM-LC diffraction structures under conditions of photoinduced optic absorption //2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – IEEE, 2021. – P. 1-5.

УДК 535.377, 538.9

**СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В УФ-ОБЛУЧЕННЫХ
НАНОТРУБКАХ ДИОКСИДА ГАФНИЯ**

**Артём Олегович Шилов, Роберт Валериевич Камалов, Андрей Владимирович Чукин,
Александр Сергеевич Вохминцев, Илья Александрович Вайнштейн**

Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

Представлены результаты исследования спектрально-разрешённой термостимулированной люминесценции нанотрубчатого диоксида гафния под воздействием фотонов УФ-диапазона. Наблюдаемое свечение формируется с участием анионных вакансий в различных конфигурационных и зарядовых состояниях. Выполнена оценка энергетических и кинетических параметров исследуемых ТСЛ процессов, сделаны предположения о возможной природе активных центров захвата и рекомбинации

Ключевые слова

HfO₂, нанотрубки, спектрально-разрешённая ТСЛ, кислородные вакансии, энергия активации

Благодарности

Работа выполнена при поддержке научного проекта Минобрнауки FEUZ-2020–0059

**SPECTRAL AND KINETIC FEATURES OF THERMALLY STIMULATED
LUMINESCENCE IN UV-IRRADIATED HAFNIA NANOTUBES**

Artem O. Shilov, Robert V. Kamalov, Andrey V. Chukin, Alexander S. Vokhmintsev, Ilya A. Weinstein

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The research of spectrally resolved thermally stimulated luminescence in HfO₂ nanotubes under the UV-photon excitation has been presented. The observed emission is formed with the participation of anion vacancies in various configurational and charge states. The energy and kinetic parameters of the investigated TSL processes were estimated, the assumptions concerning the possible origin of active capture and recombination centers were made

Keywords

HfO₂, nanotubes, spectrally resolved TSL, oxygen vacancies, activation energy

Acknowledgements

The work was supported by Minobrnauki research project FEUZ-2020-0059

Введение

Диоксид гафния является перспективным материалом для создания эффективных функциональных сред опто- и наноэлектроники нового поколения. Благодаря высокой плотности и большой атомной массе HfO₂ может выступать в качестве твердотельной матрицы для допирования различными ионами, а наличие в нем собственной люминесценции открывает перспективы применения при разработке современных сцинтилляционных элементов и белых светоизлучающих устройств. Многие структурно-чувствительные особенности и электрофизические свойства HfO₂ определяются исходными дефектами, возникающими на стадии синтеза. В частности, кислородные вакансии с варьируемыми зарядовыми параметрами и оптически активные комплексы на их основе отвечают за наблюдаемый люминесцентный отклик структур с различной морфологией и фазовым составом. Для оптимизации функциональных свойств и применения наноструктур диоксида гафния необходимо глубокое понимание особенностей электронного строения, закономерностей транспорта возбуждений и протекания других фундаментальных процессов. Ранее нами были изучены оптические

свойства тонких плёнок и наноструктурированного порошка диоксида гафния [1–2]. В данной работе проанализированы кинетические параметры спектрально-разрешённой ТСЛ в нанотубулярных массивах HfO_2 после воздействия УФ излучением.

Материалы и методы

Нанотрубки диоксида гафния выращены методом электрохимического анодирования в потенциостатическом режиме. Отжиг проведен при температуре 973 К в воздушной атмосфере. Изображения структур получены с использованием сканирующего электронного микроскопа. Исследование фазового состава осуществлялось методом рентгенофазового анализа. Регистрация спектров фотолюминесценции (ФЛ) и кривых ТСЛ проводилась на базе установки, состоящей из спектрометра и высокотемпературной приставки, позволяющей проводить исследования термоактивационных процессов в диапазоне 300–800 К. Измерение ТСЛ-кривых осуществлялось при постоянной скорости нагрева 2 К/с.

Результаты и обсуждение

По данным СЭМ в результате синтеза образуются нанотрубки диоксида гафния длиной до 15 мкм и диаметром 40–60 нм. Проведенный РФА показал, что исходные нанотубулярные массивы являются аморфными, и переходят в моноклинную фазу после проведения высокотемпературного отжига. Наличие микропримесей тяжёлых элементов в синтезированных образцах не выявлено.

При возбуждении фотонами в диапазоне 4,8–5,7 эВ наблюдается ФЛ с максимумом 2,3 эВ. После проведения отжига до 973 К положение максимума смещается в 2,6 эВ. Указанное свечение проявляется также при регистрации сигнала ТСЛ. Для полученных температурных кривых характерно наличие пиков 345 К и 625 К. Энергетические и кинетические параметры процессов ТСЛ были рассчитаны с использованием уравнения кинетики общего порядка. С учетом независимых литературных данных обсуждается возможная природа центров захвата и рекомбинации, активных в области наблюдаемого ТСЛ отклика.

Заключение

В ходе проведенного исследования впервые наблюдали ТСЛ в нанотрубках HfO_2 , облученных фотонами УФ диапазона. Установлено, что исследуемое свечение обусловлено процессами переноса носителей заряда, в которых принимают участие кислород-дефицитные центры в различных конфигурационных и зарядовых состояниях. На основе анализа термоактивационной кинетики определены энергетические параметры активных ловушек.

Литература

- [1] Shilov A.O. et al. Optical parameters and energy gap estimation in hafnia thin film //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – V. 2313. – Is. 1. – P. 030006.
- [2] Shilov A.O., Savchenko S.S., Vokhmintsev A.S., Chukin A.V., Karabanalov M.S., Vlasov M.I., Weinstein I. A., Energy gap evaluation in microcrystalline m- HfO_2 powder //Journal of Siberian Federal University. Mathematics&Physics. – 2021. – V. 14. – Is. 2. – P. 224-229.

УДК 535.343

ИМПУЛЬСНАЯ ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Иван Геннадьевич Даденков, Алексей Леонидович Толстик, Юрий Иванович Миксюк,
Константин Алексеевич Саечников

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

В работе представлены результаты исследования записи динамических голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами с длинами волн в диапазоне от 450 до 575 нм. Были установлены закономерности доминирования коротко- или долгоживущей решетки в зависимости от длины волны лазерного излучения. Проведена оптимизация спектральных условий формирования динамических голограмм, при которых достигаются наибольшие дифракционные эффективности

Ключевые слова

Динамические голограммы, фоторефрактивные кристаллы, силикат висмута, импульсная запись, перестройка длины волны

PULSE RECORDING OF DYNAMIC HOLOGRAMS IN BISMUTH SILICATE CRYSTAL IN A BROAD WAVELENGTH RANGE

Ivan G. Dadenkov, Alexei L. Tolstik, Yuri I. Miksyuk, Konstantin A. Saechnikov

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

This work presents the results of studying the recording of dynamic holograms in a bismuth silicate crystal by laser pulses with wavelengths in the range from 450 to 575 nm. Regularities were established for the dominance of a short- or long-lived grating depending on the wavelength of laser radiation. The optimization of the spectral conditions for the formation of dynamic holograms is carried out, under which the highest diffraction efficiencies are achieved

Keywords

Dynamic holograms, photorefractive crystals, bismuth silicate, pulse recording, wavelength tuning

Введение

Одним из существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов является возможность записи в них динамических голограмм в реальном времени. Это определяет их использование в адаптивных интерферометрах, голографических системах записи, хранения и обработки информации и др. [1]. Физические процессы записи голограмм в фоторефрактивных кристаллах основаны на пространственном перераспределении зарядов в поле интерферирующих световых пучков по многочисленным центрам, имеющим разнообразную природу возникновения и характеристики. По своей энергетической структуре фоторефрактивные кристаллы семейства силленитов являются широкозонными полупроводниками, при этом существенное влияние на формирование голограмм оказывают примеси и структурные дефекты кристаллической решетки, приводящие к возникновению в запрещенной зоне донорных и акцепторных энергетических уровней [2]. Особенностью кристаллов силленитов является одновременное существование как долгоживущих, так и короткоживущих ловушечных уровней [3]. Проявление данных ловушечных уровней существенно зависит от интенсивности записывающего излучения [4]. При небольших интенсивностях записываются долгоживущие решетки с временем жизни на уровне секунд, в то время как с увеличением интенсивности проявляются быстрые компоненты в диапазоне

сотен микросекунд. Однако исследования были проведены на одной длине волны 532 нм. В настоящей работе с целью оптимизации условий голографической записи проанализированы спектральные особенности формирования динамических голограмм при использовании лазерных импульсов на различных длинах волн в диапазоне от 450 до 575 нм.

Используемые методы и подходы

В качестве источника излучения, формирующего голограмму, использовался параметрический генератор (ПГ) с длительностью лазерных импульсов 10 нс и шириной линии генерации $\delta\lambda < 0,1$ нм. Была разработана оригинальная схема записи, основанная на использовании дифракционной решетки с известным периодом и телескопической системы, фокусирующей первые порядки дифракции на исследуемый кристалл. При изменении длины волны менялся и угол между первыми порядками дифракции, что приводило к автоматической подстройке и сохранению периода формируемой голографической решетки в исследуемом кристалле независимо от длины волны падающего излучения. ПГ позволял получать импульсное лазерное излучение в диапазоне от 400 нм до 2 мкм, однако был выбран диапазон 450–575 нм. Выбор коротковолновой границы диапазона обусловлен высоким поглощением излучения в кристалле силиката висмута при приближении к длине волны, отвечающей прямым межзонным переходам. В этом случае также нарушались условия объемности формируемой дифракционной решетки, и голограмма записывалась не в объеме кристалла, а в приграничном слое. Верхняя граница выбранного диапазона обусловлена снижением дифракционной эффективности при записи голограмм в красной области спектра.

Результаты и заключение

В ходе экспериментального исследования была установлена выраженная спектральная зависимость формирования короткоживущих и долгоживущих динамических решеток в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута, используемых в системах адаптивной интерферометрии. Установлено, что в синей области спектра (450–500 нм) доминирующими оказываются короткоживущие решетки с временами жизни на уровне сотни микросекунд. Однако при смещении длины волны записывающего излучения в красную область спектра их дифракционная эффективность уменьшается и доминирующими становятся долгоживущие решетки с временем жизни в несколько секунд. Также была определена оптимальная длина волны для записи динамических решеток в силикате висмута, которая составила 475 нм. При записи на этой длине волны формируемые динамические голограммы имели наибольшую дифракционную эффективность при фиксированной энергии лазерных импульсов на уровне 1 мДж.

Литература

- [1] Петров М.П. и др. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.: Наука, 1992. – 317 с.
- [2] Каргин Ю.Ф. и др. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-\delta}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства. – М.: Изд-во ИОХН РАН, – 2004. – 312 с.
- [3] Kornienko T., et al. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps // Physics Procedia – 2017. – V. 86. – P. 105–112.
- [4] Dadenkov I.G. et al. Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals // Optics and Spectroscopy. – 2020. – V. 128. – P. 1401–1406.

УДК 535.421: 778.38

ПОЛИМЕРНАЯ КОМПОЗИЦИЯ С ФЕНАНТРЕНХИНОНОМ ДЛЯ ЗАПИСИ РЕЛЬЕФНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

Владимир Васильевич Могильный *, Эдгар Арменович Храмов*,**,
Алексей Петрович Шкадаревич*

*Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», г. Минск, Беларусь

**Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

Исследованы фоторельефы на поверхности слоев полимерной композиции с основой в виде сополимера с боковыми антраценовыми группами и добавкой фенантренхинона (ФХ) в качестве фоточувствительного компонента. ФХ, выполняющий роль фотосенсибилизатора синглетного кислорода, обладает хорошей растворимостью в полимере и может быть введен в материал в концентрации до 6 массовых %. Применение ФХ создает фоточувствительность в сине-зеленой области спектра, обеспеченной рядом мощных лазерных источников излучения. Фоторельефы формировались на поверхности слоев толщиной 0,5–1 мкм после записи голографических решеток лазером $\lambda=532$ нм методом обратной пластификации материала слоя

Ключевые слова

Сенсибилизированное фотоокисление, фенантренхинон, антрацен, полимерный фотоматериал, рельефная голографическая дифракционная решетка

POLYMER COMPOSITION WITH PHENANTHRENEQUINONE FOR RECORDING RELIEF HOLOGRAPHIC GRATINGS

Uladzimir V. Mahilny, Edhar A. Khramtsov, Alexei P. Shkadarevich

*Unitary Enterprise «STC «LEMT» of the BelOMO», Minsk, Republic of Belarus

**Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract

Photoreliefs on the surface of layers of a polymer composition with a base in the form of a copolymer with side anthracene groups and the addition of phenanthrenequinone (PQ) as a photosensitive component have been studied. PQ, which acts as a photosensitizer of singlet oxygen, has good solubility in the polymer and can be introduced into the material at a concentration of up to 6 wt %. The use of PQ creates photosensitivity in the blue-green region of the spectrum, provided by a number of high-power laser radiation sources. Photoreliefs were formed on the surface of layers with a thickness of 0.5 - 1 μm after writing holographic gratings with a laser $\lambda = 532$ nm by the method of reversible plasticization of the layer material

Keywords

Sensitized photooxidation, phenanthrenequinone, anthracene, polymeric photographic material, embossed holographic diffraction grating

Введение

ФХ более известен как фоточувствительный компонент объемных голографических материалов с диффузионным усилением, но первоначально он использовался в качестве фотосенсибилизатора синглетного кислорода в составе голографического материала реоксан [1–4]. Фотоиндуцированные деформации этого материала, вызываемые фотоокислением молекул антрацена, были сведены к минимуму жесткостью полимерной матрицы. Полимерная основа рассматриваемого в настоящей работе материала гораздо более пластична, что приводит к образованию на поверхности относительно толстых (~10 мкм) слоев терморелаксационных фоторельефов, как при фотоокислении, так и при фотодимеризации боковых антраценовых групп. Высота фоторельефа невелика и составляет десятые доли процента толщины слоя [5–8]. Результаты терморелаксации в полимерной среде существенно зависят от ее пластичности, т. е. от близости температуры

процесса к температуре стеклования материала. Недостаточная пластичность ухудшает разрешающую способность и уменьшает высоту фоторельефа. Для устранения этих недостатков нами предложена и реализована обратимая пластификация тонких слоев после записи голографических структур путем набухания материала в жидкой нерастворяющей среде и последующего высушивания.

Формирование фоторельефа на поверхности слоя полимера с боковыми антраценовыми группами

Голографические решетки с периодами 1–5 мкм записывались излучением $\lambda=532$ нм по симметричной схеме и выдерживались в углеводородном растворителе 20 мин. Методика позволила увеличить относительную высоту периодического поверхностного фоторельефа с десятых долей до десятков процентов при разрешающей способности более 1000 мм^{-1} . На рис. 1 приведена интерференционная картина, демонстрирующая фоторельеф с периодом 4 мкм. Последующее УФ облучение на фоторельеф не влияло, но приводило к фотосшиванию полимерной основы.

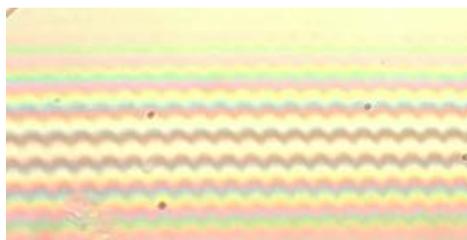


Рис. 1. Картина в окуляре интерференционного микроскопа при отражении от поверхности с фоторельефом

Природа рельефообразующей фотореакции

Для выяснения механизма рельефообразования проведены серии однородных экспонирований с доступом и без доступа атмосферного кислорода в слой. В первом случае экспонирование излучением светодиода с максимумом интенсивности вблизи 465 нм и лазерным излучением 532 нм приводит к фотопревращению антраценовых групп (рис. 2). Если контакт поверхности фоточувствительного слоя с атмосферой предотвращается покровным слоем, происходит лишь расходование ФХ, концентрация антраценовых групп остается постоянной. О том, что первичные фотопроецессы связаны с ФХ, говорят и длины волн возбуждающего света (465 и 532 нм), который антраценовыми группами не поглощается. В целом, механизм оптической записи основан на сенсibiliзованном фотоокислении и подобен описанному нами в работе [5].

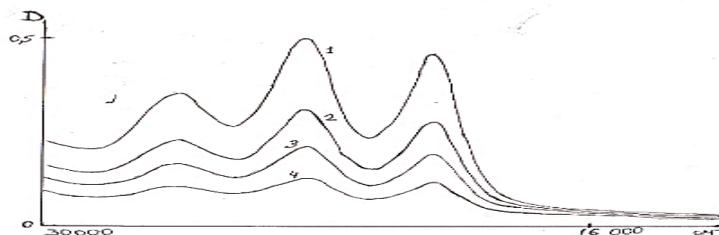


Рис. 2. Дegrадация спектров поглощения антраценовых групп в слое с фенантренхином при облучении лазером $\lambda=532$ нм:
1 – 0 с, 2–180 с, 3–1860 с, 4–3900 с

Заключение

Фотосенсибилизированное окисление нового антраценсодержащего полимера атмосферным кислородом в тонких слоях эффективно осуществляется в присутствии фенантренхинона и может быть использовано при формировании голографических поверхностных фоторельефов лазерным излучением в пределах его длинноволновой полосы поглощения.

Литература

- [1] Суханов В.И., Фазовые голограммы в регистрирующих средах с дисперсионной рефракцией // Успехи физических наук. – 1986. – № 148. – С. 541–542.
- [2] Лашков Г.И., Перенос энергии с участием триплетных состояний в фазовой регистрации света // Успехи физических наук. – 1986. – № 148. – С. 539–541.
- [3] Вениаминов А.В., Могильный В.В., Голографические полимерные материалы с диффузионным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения // Оптика и спектроскопия. – 2013. – № 6. – С. 143–167.
- [4] Могильный В.В., Полимерные фоторегистрирующие материалы и их применение: Курс лекций. Мн.: БГУ, 2003. 116 с.
- [5] Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмцов Э.А., Шкадаревич А.П., Объемный голографический материал для красной области спектра на основе полимера с боковыми антраценовыми группами // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – № 1. – С. 159–165.
- [6] Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмцов Э.А., Шкадаревич А.П., Фоторефрактивный и рельефообразующий голографический материал // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2022. – С. 629–630.
- [7] Могильный В.В., Станкевич А.И., Усиление голографических рельефных решеток, записанных в слоях фотосшиваемых полимеров // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, – 2019. – С. 273–274.
- [8] Могильный В.В., Станкевич А.И., Храмцов Э.А., Шкадаревич А.П., Фотоокисление антраценсодержащих полимеров атмосферным кислородом для объемно-фазовой и рельефно-фазовой голографической записи // Взаимод. излучений с твердым телом: Материалы 14 Международной конференции. Мн., – 2021. – С. 325–329.

УДК 535.41

**ТОНКИЕ РЕЛЬЕФНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ НА
СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ
БИХРОМИРОВАННОГО ЖЕЛАТИНА**

**Нина Мануиловна Ганжерли, Сергей Николаевич Гуляев, Ирина Анатольевна Маурер,
Александр Викторович Архипов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе приведены результаты исследований по изготовлению тонких рельефно-фазовых голографических решеток, зарегистрированных на светочувствительных средах на основе бихромированного желатина, в технологии обработки которых присутствует деструктивное воздействие коротковолнового УФ излучения

Ключевые слова

Голографические решетки, бихромированный желатин, коротковолновое УФ излучение, поверхностный рельеф, дифракционная эффективность

**THIN RELIEF HOLOGRAPHIC GRATINGS ON PHOTSENSITIVE MATERIALS
BASED ON DICHROMATED GELATIN**

Nina M. Ganzherli, Sergey N. Gulyaev, Irina A. Maurer, Alexander V. Arkhipov

Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents the results of research on the manufacture of thin relief-phase holographic gratings registered on photosensitive media based on dichromated gelatin, in the processing technology of which there is a destructive effect of short-wave UV radiation

Keywords

Holographic gratings, dichromated gelatin, short-wave UV radiation, surface relief, diffraction efficiency

Введение

Традиционные методы создания эффективных голограмм основываются на технологиях обработки слоев бихромированного желатина (БХЖ), которые позволяют получать в объеме регистрирующей среды высокочастотные фазовые структуры, обладающие высокой угловой селективностью. Целью данной работы является исследование возможности создания тонких высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с низкой угловой селективностью и высокой дифракционной эффективностью (ДЭ).

Используемые методы и подходы

Регистрация голографических решеток осуществлялась по симметричной оптической схеме излучением He-Cd лазера с длиной волны 440 нм. Использовались изготовленные в лабораторных условиях слои БХЖ толщиной от 0,7 до 15 мкм, а также промышленно выпускаемый фотоматериал ПФГ-04. Ключевым моментом технологии обработки голографических решеток являлось использование деструктивного воздействия на желатин коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 270 нм [1].

Результаты и заключение

Для получения высокочастотных голографических решеток на БХЖ необходимо нивелировать влияние сглаживающих поверхностный рельеф сил поверхностного натяжения, возникающих во влажном слое желатина в ходе стандартной процедуры обработки после облучения УФ светом. Предложено несколько вариантов усовершенствования методики обработки слоев: во-первых, сокращение до 10 секунд времени водной обработки, применяемой для удаления разрушенного УФ излучением желатина из менее задубленных участков, совпадающих с минимумами интерференционной картины [2, 3], во-вторых, применение высокотемпературной обработки образцов (160-170°C), приводящей к разложению и испарению желатина из менее задубленных участков слоя и увеличению глубины поверхностного рельефа [4], а также использование отличных от воды травящих реагентов, например, ледяной уксусной кислоты (ЛУК) и ее растворов в изопропиловом спирте (ИПС) с последующим окончательным обезвоживанием слоя купанием в 100% ИПС [5]. Данная технология обработки также была применена для получения высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с частотой порядка 1600 мм^{-1} на отечественном промышленно выпускаемом фотоматериале ПФГ-04 на основе БХЖ. Достигнутая ДЭ тонких рельефных решеток 67%, близка к максимальной ДЭ 70%, заявленной производителем данного материала для толстых объемных голографических структур [6]. Применение иммерсионных жидкостей, а также анализ профилей поверхностного рельефа с помощью атомно-силовой микроскопии подтвердили рельефно-фазовый характер голографических структур на БХЖ [3].

Впервые продемонстрирована возможность создания эффективных высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с ДЭ от 40 до 64% на сверхтонких слоях БХЖ толщиной от 0,7 до 5,6 мкм, изготовленных в лаборатории. Результаты представленных исследований будут способствовать расширению сферы применения светочувствительных сред на основе БХЖ.

Литература

- [1] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Эффект воздействия коротковолнового УФ излучения при записи голографических структур на содержащих желатин регистрирующих средах (обзор) // Оптика и спектроскопия, – 2018. – Т. 125. – №. 7. – С. 62–70.
- [2] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Хазвалиева Д.Р., Высокочастотные рельефно-фазовые голографические решетки на обработанном коротковолновым УФ-излучением бихромированном желатине // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – №. 12. – С. 30–32.
- [3] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В., Механизмы создания рельефных высокочастотных голографических структур на бихромированном желатине, облученном коротковолновым УФ излучением // Автометрия. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 92–99.
- [4] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Применение термообработки при формировании рельефно-фазовых голографических структур на бихромированном желатине // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 10. – С. 1507–1511.
- [5] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Совершенствование технологии изготовления рельефных голографических решеток на бихромированном желатине, облученных коротковолновым УФ излучением // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 10. – С. 1276–1279.
- [6] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В., Регистрация высокочастотных рельефно-фазовых голографических структур на фотоматериале ПФГ-04 // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. – №. 21. – С. 13–15.

УДК 535.421

ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ВВОДА/ВЫВОДА НА ОСНОВЕ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА ДЛЯ AR/MR УСТРОЙСТВ

Сергей Александрович Иванов, Екатерина Сергеевна Мусихина, Николай Валентинович Никоноров

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты разработки волновода на фото-термо-рефрактивном стекле для систем дополненной и смешанной реальности. Ввод и вывод в волновод организованы с помощью пропускающих объемных брэгговских решеток. В работе проведен анализ нескольких вариантов решеток ввода. Проведена запись нескольких волноводов с различным количеством решеток. Проведены измерения углового поля зрения, которое может передать одна решетка в такой системе. Продемонстрирована работа системы с коммерчески доступным проектором

Ключевые слова

Дифракция, брэгговская решетка, волновод, фото-термо-рефрактивное стекло, дополненная реальность

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы развития ИТМО-2030

PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSBASED WAVEGUIDE INPUT/OUTPUT SYSTEM FOR AR/MR DEVICES

Sergei A. Ivanov, Ekaterina S. Musikhina, Nikolay V. Nikonorov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents the results of the development of a waveguide based on photo-thermo-refractive glass for augmented and mixed reality systems. The input and output to the waveguide are organized using transmissive volumetric Bragg gratings. The paper analyzes several variants of input gratings. Several waveguides with different numbers of gratings were recorded. Measurements of the angular field of view, which can be transmitted by one grating in such a system, have been carried out. The operation of the system with a commercially available projector is demonstrated

Keywords

Diffraction, Bragg grating, waveguide, photo-thermo-refractive glass, augmented reality

Acknowledgements

This work is supported by ITMO-2030 Development Program

Введение

В настоящее время технология расширенной реальности очень востребована по всему миру [1]. Особый интерес представляют системы, в основе которых лежит дифракционный принцип ввода и вывода изображения в волновод. В таких системах ввод/вывод изображения осуществляется за счет дифракции на дифракционной решетке. При этом дифракционная решетка может быть любого типа. В частности, известны варианты реализации на рельефных решетках, тонкопленочных голограммах и объемных голограммах. Однако, особого распространения вариант с объемными решетками не получил, так как известные решения используют различные полимерные материалы, которые требуют дополнительной защиты и не обладают высокой селективностью. А также, материалы, которые используются для записи голограмм, не являются волноводами.

В настоящей работе рассмотрена концепция волновода, который является голографической средой. Соответственно, решетки ввода/вывода записаны в самом волноводе и являются его частью.

Используемые методы и подходы

Для проведения эксперимента на базе научно-исследовательского центра оптического материаловедения университета ИТМО было синтезировано фото-термо-рефрактивное стекло [2].

Синтез стекла производился в высокотемпературной лабораторной печи Carbolite GERO при температуре 1440°C в платиновом тигле. Перемешивание расплава осуществлялось платиновой мешалкой. Отжиг стекла производился в муфельной печи в течение 10 ч при температуре 485°C.

Для проведения эксперимента были изготовлены пластины 40×20×2 мм. Поверхность образцов была предварительно отшлифована и отполирована.

Запись решеток в ФТР стекле осуществлялась путем облучения стекла излучением гелий-кадмиевого лазера Kimmon K Series IK3501R-G с длиной волны излучения 325 нм.

Проявление голограмм проводилось при термообработке. Термообработка производилась в муфельной печи Nabertherm N11/2 при температуре 500°C в течение 6 часов. До температуры термообработки печь нагревалась с комнатной температуры (~25°C) со скоростью 5°C в минуту.

Определение дифракционной эффективности записанных решеток осуществлялось с помощью анализа контуров угловой селективности голограмм для прошедшего пучка. Длина волны лазера для анализа контуров угловой селективности должна соответствовать условию полного внутреннего отражения (ПВО) для записанной системы. Так, был использован диодный лазер с длиной волны 532 нм.

Результаты и заключение

В работе был проведен анализ оптимальной конфигурации решеток ввода/вывода. Выбран оптимальный вариант с точки зрения записи. В результате записан волновод с решетками ввода/вывода в нескольких исполнениях. Проведены измерения поля зрения, выводимого одной решеткой. Продемонстрирована работа волновода с использованием коммерчески доступного DLP-проектора.

Литература

- [1] Kress B.C., Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective //Nanophotonics. – 2021. – V. 10. – Is. 1. – С. 41–74.
- [2] Nikonorov N., Ivanov S., Dubrovin V., Ignatiev A. New photo-thermo-refractive glasses for holographic optical elements: properties and applications //Holographic Materials and Optical Systems. – 2017. – P. 435–461.

УДК 535.421

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА МНОГОСЛОЙНЫХ
НЕОДНОРОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ КПЖК
СТРУКТУРАХ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ЛИНЕЙНОМ И НЕЛИНЕЙНОМ
РЕЖИМАХ ЗАПИСИ**

Виктор Олегович Долгирев, Сергей Николаевич Шарангович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация

В работе представлено исследование дифракции света на многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах (МНГДС), сформированных в капсулированных полимером жидких кристаллах (КПЖК) при линейном и нелинейном режимах записи. С помощью численного моделирования было показано, что увеличение степени неоднородности профилей решеток по глубине слоев, обусловленное нелинейным режимом записи МНГДС, может приводить к ухудшению дифракционных характеристик

Ключевые слова

МНГДС, КПЖК, дифракция

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»

**RESEARCH OF LIGHT DIFFRACTION ON MULTILAYER INHOMOGENEOUS
HOLOGRAPHIC DIFFRACTIVE PDLC STRUCTURES FORMED IN LINEAR AND
NONLINEAR RECORDING MODES**

Victor O. Dolgirev, Sergey N. Sharangovich

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract

The work presents research of light diffraction on multilayer inhomogeneous holographic diffraction structures (MHDS) formed in polymer-dispersed liquid crystals (PDLC) under linear and nonlinear recording modes. Numerical simulations have shown that an increase in the degree of inhomogeneity of the lattice profiles in the depth of the layers due to the nonlinear recording mode of the MHDS can lead to a deterioration of the diffraction characteristics

Keywords

MHDS, PDLC, diffraction

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the strategic academic leadership program "Priority-2030"

Введение

Как известно, угловая селективность МНГДС представляет из себя набор локальных максимумов, который зависит от геометрических соотношений дифракционного и промежуточного слоя, а общая огибающая контура угловой селективности соответствует одиночной голографической дифракционной структуре (ГДС) [1, 2].

Ранее, авторами в работе [1] отмечалось, что при записи МНГДС в фотополимеризующихся композициях с учетом просветления материала, дифракционные характеристики могли искажаться вследствие неоднородности формируемых профилей решеток. Фотоиндуцированное поглощение материала напрямую влияет на условия записи в каждой точке ГДС, вследствие чего может наблюдаться как линейный, так и нелинейный режим записи, который может приводить к сильной трансформации профиля с течением времени и, как следствие, приводить к ухудшению дифракционных характеристик.

Таким образом, исследование влияния режима записи на дифракционные

характеристики МНГДС с КПЖК становится актуальным.

Теоретическая модель дифракции света на МНГДС с КПЖК

Для математической модели дифракции из [2] предполагается, что МНГДС с КПЖК считывается плоской световой волной с поляризацией, совпадающей с необыкновенными собственными волнами в образце. Решение для дифрагированного поля ищется матричным методом, путем произведения входного светового поля на матрицы перехода и матрицы передаточных функций каждого слоя, которые описываются элементами [2]:

$$\{T_{01,10}^{n,e} = -i \frac{b_j^{n,e}}{2} \int_{-1}^1 \left(\frac{\exp \exp\left(\frac{-i\Delta K(1-q)}{2}\right)}{\cosh \cosh\left[c \cdot s \cdot \frac{1-q}{2}\right]} \cdot 2F_1\left(\frac{-b_j^{n,e}}{c \cdot s}, \frac{b_j^{n,e}}{c \cdot s}, 1, w(q)\right) dq\right) T_{00,11}^{n,e} = 1 -$$

$$- \frac{(b_j^{n,e})^2}{2} A \int_{-1}^1 \left(\frac{\exp \exp(i\Delta K(1-q)/2)}{(c \cdot s \cdot (1+q)/2)} \cdot 2F_1\left(1 - \frac{b_j^{n,e}}{c \cdot s}, 1 + \frac{b_j^{n,e}}{c \cdot s}, 2, w(q)\right) dq\right),$$

где $b_j^{n,e}$, c , s , t , $2F_1$, $w(q)$, A подробно представлены в работе [2].

Численный расчет

Используя методику из работы [2], были численно рассчитаны дифракционные эффективности (ДЭ) для двухслойной ($N = 2$) ГДС, сформированных в условиях линейного и нелинейного режима записи. Для расчета использовались следующие параметры: $d_n = 20$ и $t_n = 60$ мкм – толщина КПЖК и промежуточного слоя, $\theta = 10^\circ$ – угол Брэгга, $\lambda = 633$ нм – длина волны, $c = \{-0.364; 0.614\}$ и $\{1.446; 1.533\}$, $s = \{2.187; 0.864\}$ и $\{0.884; 0.618\}$, $t = \{-0.404; -1.307\}$ и $\{1.599; 0.694\}$ – параметры для нормированных профилей решеток для каждого слоя при линейном ($b = 5$) и нелинейном режиме записи ($b = 0.1$), b – отношение времени полимеризации к времени диффузии.

На рисунке 1 приведены зависимости ДЭ от угла считывания для двухслойных ГДС, сформированных в условиях нелинейного (рисунок 2а) и линейного (рисунок 2б) режима записи.

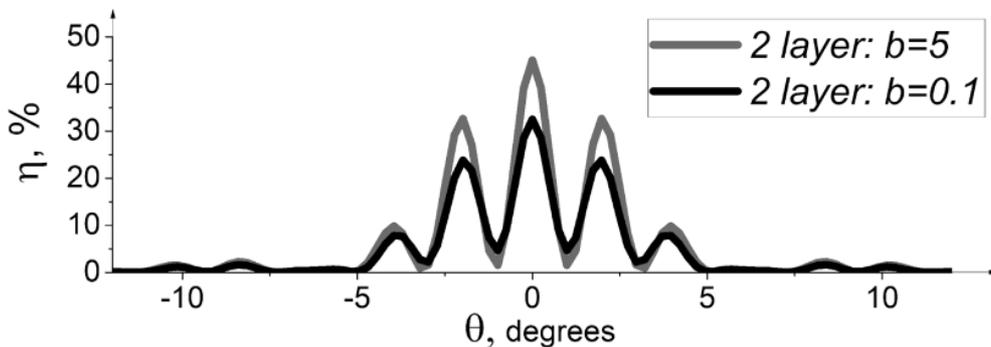


Рис. 1. Угловая селективность для двухслойной ГДС

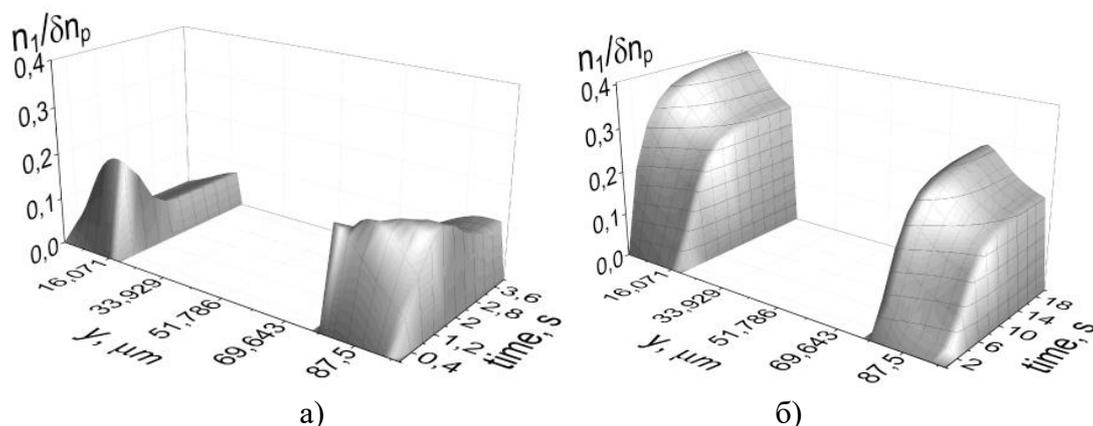


Рис. 2. Кинетики формирования амплитуды первой гармоники показателя преломления при $b = 0.1$ (а) и $b = 5$ (б)

Угловая селективность (рис. 1) сформированной в условиях нелинейного режима записи имеет заметные искажения и меньшую ДЭ, что обусловлено неоднородностью профилей и уровнем амплитуды первой гармоники показателя преломления в каждом слое по сравнению с ГДС, сформированной в условиях линейного режима.

Заключение

Таким образом, формирование МНГДС в условиях нелинейного режима записи может приводить к ухудшению дифракционных характеристик, вследствие увеличения уровня неоднородности профилей решеток в процессе их голографического формирования.

Литература

- [1] Dudnik D.I, Sharangovich S.N. Interaction between light and transmission multi-layered heterogeneous photopolymer holographic diffraction structures //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2021. – V. 85. – Is. 1. – P. 8–14.
- [2] Dolgirev V.O., Sharangovich S.N. Diffraction of Light on Inhomogeneous Multilayer Holographic Diffraction Structures in Photopolymer Liquid Crystal Compositions //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – V. 86. – Is. 1. – P. 18-23.

УДК 681.78

УЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДИСПЛЕЯ С КОМПОЗИТНОЙ ГОЛОГРАММОЙ

Дамир Маратович Ахметов, Данила Юрьевич Харитонов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Аннотация

Дисплеи волноводного типа с объемными фазовыми голограммами отличаются малыми размерами, большим выходным зрачком и высоким коэффициентом пропускания как в канале проецируемого изображения, так и в канале прямого видения. Однако с увеличением апертуры, поля зрения и рабочего спектрального диапазона увеличивается разброс условий воспроизведения голограммы по ее поверхности, что накладывает ограничения на пространственное разрешение и дифракционную эффективность. Для его преодоления предлагается использовать композитную голограмму, т.е. объемную фазовую решетку, разделенную на суб-апертуры с независимо изменяющимися параметрами наклона полос, их формы, толщины голографического слоя и глубины модуляции. Применение такого элемента рассматривается на примере дисплея, работающего в диапазоне 480–620 нм с полем зрения $6^\circ \times 8^\circ$ и выходным зрачком 8 мм

Ключевые слова

Композитная голограмма, дифракционная эффективность, объемно-фазовая голограмма, волноводный голографический дисплей

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-79-00082

CONSIDERATION OF TECHNOLOGICAL LIMITATIONS IN CALCULATIONS OF THE OPTICAL SCHEME OF A DISPLAY WITH A COMPOSITE HOLOGRAM

Damir M. Akhmetov, Danila Yu. Kharitonov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract

Waveguide-type displays with volume phase holograms are notable for their small size, large eyebox and high transmission in both the projected image and see-through channels. However, as the aperture, field of view and working spectral range grow, the variation of the hologram replay conditions across its' surface increases and sets a performance limitation in terms of the resolution and diffraction efficiency. In order to overcome it, we propose to use a composite hologram, i.e. a volume phase grating split into sub-apertures with independently varying parameters as the fringes tilt, their pattern, the holographic layer thickness and modulation depth. Application of such an element is considered on an example of display working in the range of 480-620 nm with $6^\circ \times 8^\circ$ field of view and 8mm exit pupil

Keywords

Composite Hologram, diffraction efficiency, volume phase hologram, waveguide holographic display

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the RSCF grant No. 21-79-00082

Введение

Технологии дополненной реальности (AR) представляют собой быстро развивающуюся область. В последние годы она вышла на уровень серийного производства коммерческих устройств. Однако некоторые из используемых технических решений остаются несовершенными, что определяет актуальность новых исследований в данном направлении.

Оптическая система дисплея дополненной реальности может быть построен на базе вынесенного комбинера с голографическим или дихроичным светоделителем, призмы свободной формы или волновода. Последний вариант обычно использует дифракционные,

в т. ч. голографические, элементы для ввода и вывода пучка и отличается компактностью, относительной простотой конструкции, высокой яркостью и разрешением в ограниченном поле зрения, а также возможностью реализации многократного вывода пучка для увеличения области согласования с глазом наблюдателя [1–3].

Дисплей с композитной голограммой

Композитный голографический элемент, записанный путем совмещения нескольких элементарных полей на одной подложке. Такие характеристики, как дифракционная эффективность, спектральная и угловая селективность, поляризационные, дисперсионные и абберационные свойства, могут управляться локально, позволяя увеличить количество свободных корректирующих переменных и улучшить распределение характеристик оптической системы по апертуре/полю.

Рассмотрим в качестве примера дисплей, работающий в диапазоне 480–620 нм с полем зрения $6^\circ \times 8^\circ$ и выходным зрачком 8 мм (рисунок (а)). Для вывода излучения из волновода используется композитная объемно-фазовая голограмма из 4 зон (рисунок (б)). За счет независимой оптимизации наклона полос, толщины и глубины модуляции в каждой зоне удается повысить дифракционную эффективность (ДЭ) для угла поля зрения на 13,8% и приблизить ее распределение по полю и спектру к равномерному (при целевом значении 50%).

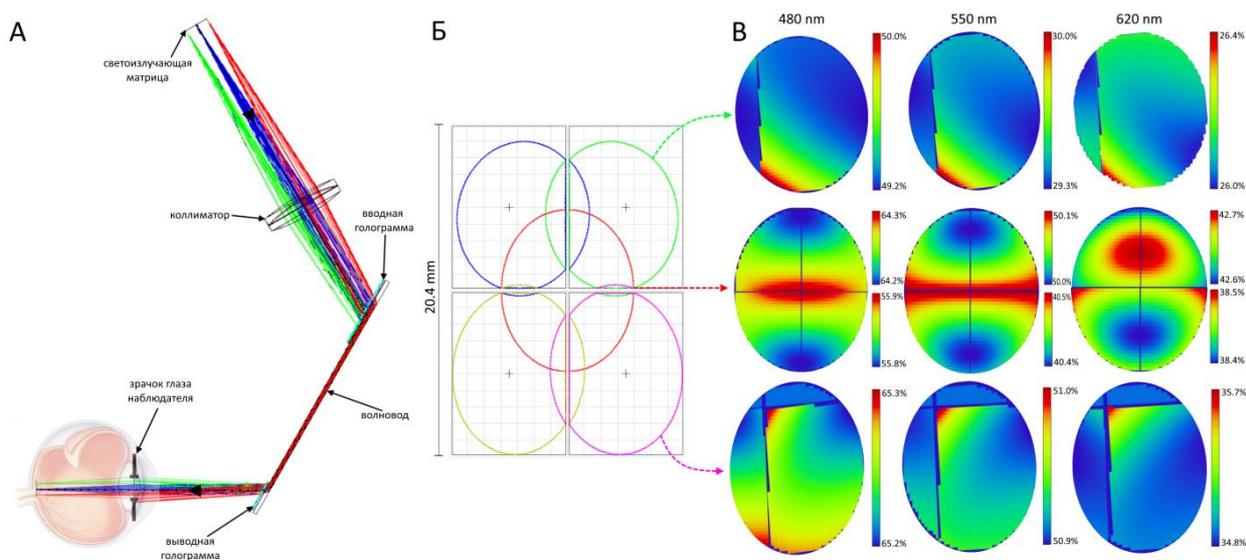


Рисунок. Волноводный дисплей с композитной голограммой: А – оптическая схема, Б – заполнение апертуры выводной голограммы, В – распределение ДЭ

Анализ чувствительности ДЭ к изменениям параметров схемы записи показал, что ДЭ для центра/угла поля зрения изменяется, соответственно, на $0,33 \text{ рад}^{-1}/0,514 \text{ рад}^{-1}$ в зависимости от углов в схеме записи, $0,56 \text{ мкм}^{-1}/0,87 \text{ мкм}^{-1}$ – от толщины слоя, $0,06/0,09$ – на 1% показателя преломления. При этом чувствительность к углам записи выше в длинноволновой области, к параметрам слоя – в коротковолновой.

Результаты и заключение

На примере цветного AR-дисплея продемонстрированы преимущества составной голограммы, заключающиеся в более равномерном распределении дифракционной

эффективности по полю и рабочему диапазону спектра. Кроме того, наш анализ показывает, что эффекты скачкообразного изменения ДЭ на границах суб-апертур не слишком сильны (см. рисунок (в)), а требования к точности юстировки схемы записи выполнимы.

В будущем следует изучить возможность увеличения количества суб-апертур и изменения их формы. Кроме того, мы планируем более подробно изучить свойства голографического материала и возможность реализации такого дизайна с определенным коммерческим светочувствительным материалом.

Литература

- [1] Kim J., O, S.W., Choi J., Park S., Kim W. Optical see-through head-mounted display including transmittance-variable display for high visibility //Journal of Information Display. – 2022. – V. 23. – Is. 2. – P. 121–127.
- [2] Wei L., Li Y., Jing J., Feng L., Zhou J. Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface //Optics express. – 2018. – V. 26. – Is. 7. – P. 8550–8565.
- [3] Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations //Digital Optical Technologies 2019. – 2019. – V. 11062. – P. 75–100.

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535:778.38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАПЕЛЬ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Алексей Сергеевич Ольшуков, Виктор Валентинович Дёмин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, НОЦ ОФТ, г. Томск, Россия

Аннотация

Голографический способ определения показателя преломления капель, который основывается на представлении капли в виде линзы, реализован методом цифровой голографии. На этапе восстановления цифровых голограмм определяется размер капли и расстояние от ее центрального сечения до точки фокусировки преломленного света. По полученным данным рассчитывается показатель преломления материала капли. В работе представлены предварительные экспериментальные результаты

Ключевые слова

Цифровая голография, показатель преломления, параметры капли

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00185)

EVALUATION OF DROPLET CHARACTERISTICS BY DIGITAL HOLOGRAPHY

Alexey S. Olshukov, Victor V. Dyomin

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

The holographic method for determining the refractive index of droplets, which is based on the representation of a drop in the form of a lens, is implemented by digital holography. At the stage of reconstruction of digital holograms, the size of the drop and the distance from its central section to the focus point of the refracted light are determined. According to the data obtained, the refractive index of the drop material is calculated. The report presents preliminary experimental results

Keywords

Digital holography, refractive index, parameters of droplets

Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 20-17-00185)

Введение

Необходимость определения характеристик капель возникает в различных исследовательских и технических задачах – аттестация генераторов аэрозолей, исследование факелов распыла топливных форсунок, обнаружение капель нефти в воде и т. п. Голографические методы, обычно используют для получения информации о размере, форме, пространственном положении каждой капли. В работах [1–2] предложен метод, позволяющий дополнительно получить из голографического изображения информацию о показателе преломления материала капель.

В настоящей работе этот метод реализован средствами цифровой голографии, что позволяет повысить точность определения показателя преломления и упростить процесс цифровой обработки голограмм и восстановленных изображений.

Описание метода

Предложенный в работах [1–2] метод определения показателя преломления капель основывается на представлении капли (части капли) в виде линзы. При регистрации

цифровой голограммы капли по осевой схеме, за прозрачной (или полупрозрачной каплей) распространяется две волны – дифрагировавшая и преломленная, которые в сумме и представляют собой предметную волну. Поэтому в восстановленном изображении на расстоянии f от центрального сечения капли наблюдается точка фокусировки излучения, прошедшего через каплю на этапе регистрации голограммы. Расстояние f зависит от размера капли a , показателей преломления материала капли n и окружающей среды n_1 : $f = f(a, n, n_1)$. Из геометрических соображений можно получить выражение для показателя преломления капли $n = \frac{2f \cdot n_1}{(2f - a)}$. Поскольку понимается, что f – фокусное

расстояние толстой линзы, а такая линза имеет серьезные aberrации, определение места фокусировки представляет непростую задачу. Для нахождения плоскости параксиального фокуса чрезвычайно полезна «цифровая перефокусировка», которая может быть проведена с любым шагом вдоль оси голограммы, что позволяет надеяться на повышение точности метода. Действительно, в работах [1–2] метод реализовывался средствами фотоголографии, а плоскость фокусировки обнаруживалась оператором визуально путем перефокусировки горизонтального микроскопа. Это, в основном, и обусловило погрешность определения показателя преломления около 10%.

Для апробации способа [1–2], реализованного средствами цифровой голографии, был проведён эксперимент по регистрации цифровых осевых голограмм капель воды, зафиксированных на подвесе в воздухе.

Заключение

В результате обработки десяти серии зарегистрированных голограмм было рассчитано среднее значение показателя преломления капли воды $n = 1,3$ и его абсолютная погрешность $\Delta n = 0,08$, относительная погрешность показателя преломления капли составила 5,8%. Существенный вклад в погрешность определения показателя преломления вносят методы определения плоскости наилучшего изображения центрального сечения капли и плоскости фокусировки преломленного излучения.

Литература

- [1] Демин В.В., Степанов С.Г. Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – №. 7. – С. 671–676.
- [2] Демин В.В. Голографический способ определения показателя преломления частиц дисперсных сред Патент №2124194 РФ, МПК6 G01N21/45., Заявл. 13.12.1994; Оpubл. 27.12.1998.

УДК 53.06

3D КАРТИРОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИК ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Николай Николаевич Юдин*, Виктор Валентинович Дёмин*, Александр Иванович Грибенюков**, Игорь Георгиевич Половцев*, Сергей Николаевич Подзывалов*, Михаил Михайлович Зиновьев*, Елена Сергеевна Слюнько*, Алексей Сергеевич Ольшуков*, Александра Юрьевна Давыдова*

**Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

***Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

Аннотация

Предмет исследования. Была произведена апробация метода цифровой голографии в ИК диапазоне для выявления объемных дефектов монокристаллов $ZnGeP_2$. **Метод.** Произведена верификация голографического метода путем сопоставления полученных данных о дефектной структуре кристалла $ZnGeP_2$ с результатами, полученными методами рентгеновской топографии, химического травления поверхности и просвечивающей оптической микроскопии. Максимальная разрешающая способность экспериментальной установки составила ~5 мкм. **Основные результаты.** При помощи метода цифровой ИК голографии были визуализированы такие объемные дефекты кристаллической структуры $ZnGeP_2$ как: полосы роста, ряды дислокаций, включения второй фазы (Zn_3P_2) в виде иголок достигающих размеров ~ 100 мкм в длину и ~ 10 мкм в ширину. При помощи алгоритмов машинного обучения опробована возможность в автоматическом режиме обрабатывать восстановленные изображения и идентифицировать дефекты. На основе результатов автоматического распознавания и характеристики объемных дефектов $ZnGeP_2$ по голографическим данным производилось построение 3D модели расположения дефектов в кристалле. **Практическая значимость.** Проведенные экспериментальные исследования с образцами монокристаллического $ZnGeP_2$ продемонстрировали перспективы применения цифровой голографии для технологического и аттестационного контроля качества оптических монокристаллов. При этом, показано, что по результатам голографического теста можно выполнять: диагностику включений и оптических неоднородностей на предмет соответствия монокристалла показателям оптического качества, включая возможность измерения информативных размеров; диагностику оптических материалов ИК диапазона; виртуальную (численно, в режиме постэксперимента) перефокусировку в большом диапазоне оптической толщины, без ограничения, присущего реальным увеличивающим системам, связанного с конечным передним рабочим отрезком увеличивающей системы

Ключевые слова

Цифровая голография, $ZnGeP_2$, объемные дефекты, 3D картирование

Благодарности

Результаты были получены в рамках реализации государственного задания Министерства образования и науки России, проект № FSWM-2020-0038

3D MAPPING OF INCLUSIONS IN OPTICAL MATERIALS USING IR DIGITAL HOLOGRAPHY

Nikolay N. Yudin, Victor V. Dyomin, Alexander I. Gribenyukov, Igor G. Polovtsev, Sergey N. Podzivalov, Mikhail M. Zinoviev, Elena S. Slyunko, Alexey S. Olshukov, Alexandra Yu. Davydova

**National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

***Institute of monitoring of climatic and ecological system SB RAS, Tomsk, Russia*

Abstract

The subject of the study. The method of digital holography in the IR range was tested to identify volumetric defects of $ZnGeP_2$ single crystals. **Method.** The holographic method was verified by comparing the obtained data on the defective structure of the $ZnGeP_2$ crystal with the results obtained by X-ray topography, chemical etching of the surface and transmission optical microscopy. The maximum resolution of the experimental setup was ~5 μm . **The main results.** Using the digital IR holography method, such volumetric defects of the crystal structure of $ZnGeP_2$ were visualized as: growth bands, rows of dislocations, inclusions of the second phase (Zn_3P_2) in the form of needles reaching sizes ~ 100 μm in length and ~ 10 μm in width. With the help of machine learning algorithms, the ability to automatically process restored images and identify defects has been tested. Based on the results of automatic recognition and characterization of $ZnGeP_2$ volumetric effects, a 3D model of the location of defects in the crystal was constructed using holographic data. **Practical significance.** The conducted experimental studies with samples of

single-crystal ZnGeP₂ demonstrated the prospects of using digital holography for technological and certification quality control of optical single crystals. At the same time, it is shown that according to the results of the holographic test, it is possible to perform: diagnostics of inclusions and optical inhomogeneities for compliance of a single crystal with optical quality indicators, including the possibility of measuring informative dimensions; diagnostics of optical materials in the IR range; virtual (numerically, in the post-experiment mode) refocusing in a large range of optical thickness, without the limitation inherent in the real enlarging systems associated with the final front working segment of the enlarging system

Keywords

Digital holography, ZnGeP₂, volumetric defects, 3D mapping

Acknowledgements

The results were obtained as part of the implementation of the state task of the Ministry of Education and Science of Russia, the project № FSWM-2020-0038

Введение

Из-за присутствия в составе соединения ZnGeP₂ двух легко летучих компонентов (Zn и P), способных формировать устойчивые бинарные фазы, при выращивании монокристаллов из расплава предварительно синтезированного соединения, происходит «легирование» кристаллов ZnGeP₂ собственным нелетучим компонентом - Ge и/или бинарными соединениями металлических компонент с фосфором – GeP и/или Zn₃P₂. Такое легирование может привести к образованию дефектов достигающих размеров ~ 10-50 мкм, что снижает оптическое качество материала и, соответственно, его потенциальную эффективность [1]. Разработка технических средств, позволяющих контролировать, то есть выявлять, визуализировать, измерять и классифицировать объемные дефекты монокристаллов в одном измерительном эксперименте, является актуальной технической задачей. Основной целью проводимых исследований являлась апробация метода цифровой голографии совместно с алгоритмами машинного обучения для выявления объемных дефектов монокристаллов ZnGeP₂.

Современные CCD (или CMOS) -камеры обладают достаточным разрешением для регистрации цифровых голограмм. Цифровая голограмма представляет собой дискретный двумерный массив оцифрованных значений интенсивности картины интерференции опорной и предметной волн [2]. Это распределение используется в качестве исходного, а численный расчет в компьютере дифракционного интеграла [3] позволяет рассчитать распределение поля (а затем интенсивности) в плоскости на заданном расстоянии от плоскости голограммы (то есть в соответствующем поперечном сечении исследуемого объема).

Заключение

Экспериментальный стенд, разработанный в данной работе, включающий CCD камеру с размером пикселя 7,4 мкм и лазерный диод, генерирующий излучение на длине волны 1,064 мкм, а также разработанный софт позволили выявить и идентифицировать объемные дефекты с минимальными линейными размерами ~5мкм.

Литература

- [1] Verozubova G.A., Gribenyukov A.I., Mironov Yu P. Two-temperature Ssynthesis of ZnGeP₂ //Inorganic Materials. – 2007. – V. 43, – Is. 10, – P. 1040–1045.
- [2] Schnars U., Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin: Sprinder, 2005. 164 p.
- [3] Collier R., Burkhart C., Lin L., Optical Holography. N.-Y.: Acad. Press, 1971. 341 p.

УДК 535.4

КОГЕРЕНТНОСТЬ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ЧАСТИЦ

Александра Юрьевна Давыдова

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрено влияние когерентности на качество изображений частиц, восстановленных из цифровых голограмм. **Метод.** Для оценки влияния когерентности на качество голографического изображения использовано несколько критериев качества изображения. **Основные результаты.** Влияние когерентности в виде двойникового изображения может быть уменьшено путем увеличения расстояния между частицей и плоскостью регистрации, в противном случае необходимо применение одного из методов подавления двойникового изображения, например, пространственно-частотного. Для подавления нестационарного когерентного шума достаточно усреднения по трем цифровым голограммам или изображениям частиц. Установлено ограничение на протяженность среды в зависимости от ее мутности. **Практическая значимость.** Результаты могут быть применены при исследовании взвешенных частиц в различных средах методами цифровой голографии в целях подавления когерентного влияния и улучшения качества голографических изображений частиц

Ключевые слова

Цифровая голография, когерентность, качество изображения, двойниковое изображение, усреднение

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00185)

COHERENCE IN DIGITAL HOLOGRAPHY OF PARTICLES

Alexandra Yu. Davydova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

The subject. The effect of coherence on the quality of particle images reconstructed from digital holograms is considered. **The method.** To assess the effect of coherence on the quality of a holographic image, several image quality criteria were used. **Main results.** The influence of coherence in the form of a twin image can be reduced by increasing the distance between the particle and the registration plane, otherwise one of the methods of twin image suppression, for example, spatial frequency method, must be used. To suppress non-stationary coherent noise, averaging over three digital holograms or particle images is sufficient. A limitation was established on the length of the medium depending on its turbidity. **Practical significance.** The results can be applied in the study of suspended particles in various media by digital holography methods in order to suppress the coherent effect and improve the quality of the holographic images of particles

Keywords

Digital holography, coherence, image quality, twin image, averaging

Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 20-17-00185)

Введение

Методы цифровой голографии позволяют регистрировать за одну экспозицию информацию обо всех частицах исследуемого объема и исследовать их неинвазивными оптическими методами. Это преимущество обеспечивается использованием когерентного излучения при регистрации голограмм. При этом возникает и отрицательное воздействие когерентного излучения на голографическое изображение частицы – искажения, связанные как с рассеянием в среде, в которой расположена исследуемая частица, так и с двойниковым изображением [1]. Проявляются они в связи с тем, что при воспроизведении изображения частицы посредством освещения голограммы когерентной волной, восстанавливается не только область интереса, но и все остальные частицы, которые присутствовали в

зарегистрированной сцене. В работе рассмотрены некоторые элементы оптимизации баланса «полезных» и «вредных» проявлений когерентной природы голографии в применении к погружной цифровой голографической камере ДНС, предназначенной для регистрации и исследования взвешенных частиц [2]. Для оценки влияния когерентности на качество голографического изображения использовано несколько критериев качества изображения.

Двойниковое изображение

Одной из особенностей голографии является формирование одновременно двух когерентных восстановленных изображений (мнимого и действительного). Волны, их формирующие, взаимодействуют друг с другом, образуя интерференционную картину [3]. Применение одного из методов подавления двойникового изображения – пространственно-частотного – повышает качество изображения частицы. Исследования также показали, что при увеличении расстояния между частицей и плоскостью регистрации влияние двойникового изображения уменьшается.

Мутность среды и нестационарные когерентные шумы

В работе показано, что для подавления нестационарного когерентного шума, обусловленного рассеянием в среде, достаточно усреднения по трем цифровым голограммам или изображениям частиц. При увеличении мутности среды оптический сигнал может существенно ослабеть и единственный способ получить изображение частицы приемлемого качества – уменьшить протяженность рассеивающей среды. В работе установлено ограничение на протяженность среды в зависимости от ее мутности.

Заключение

Влияние когерентности в виде двойникового изображения может быть уменьшено путем увеличения расстояния между частицей и плоскостью регистрации, в противном случае необходимо применение одного из методов подавления двойникового изображения, например, пространственно-частотного.

Исследования влияния нестационарных когерентных шумов на качество изображения частицы, восстановленного из цифровой голограммы, показали, что для подавления нестационарного когерентного шума достаточно усреднения по трем цифровым голограммам или изображениям частиц. А при увеличении мутности среды необходимо уменьшение протяженности рассеивающей среды. В работе установлено ограничение на протяженность среды в зависимости от ее мутности.

Литература

- [1] Monaghan D.S. et al. Twin removal in digital holography using diffuse illumination //Optics letters. – 2009. – V. 34. – Is. 23. – P. 3610–3612.
- [2] Dyomin V. et al. Monitoring of plankton spatial and temporal characteristics with the use of a submersible digital holographic camera //Frontiers in Marine Science. – 2020. – V. 7. – P. 653.
- [3] Davydova A.Y., Dyomin V., Polovtsev I. Evaluation of the effect of noise in a digital holographic system on the quality of reconstructed particle image //Proc. SPIE. – 2020. – V. 11560. – P. 1156020-1-1156020–6.

УДК 53.06

ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ АВИАЦИОННОГО СТЕКЛА В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Михаил Михайлович Зиновьев, Николай Николаевич Юдин, Павел Владимирович Павлов, Виктор Валентинович Дёмин, Игорь Георгиевич Половцев, Илья Эдуардович Кусков, Игорь Эдуардович Вольф, Александр Олегович Евсин, Александр Антонович Балашов, Александр Сергеевич Костин, Сергей Николаевич Подзивалов

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Аннотация

Для определения дефектов фторорганического авиационного стекла, в частности глубины и характерных размеров усталостных повреждений, использовался метод цифровой голографии. Данный метод позволяет определить характерные поперечные и продольные размеры поверхностных дефектов деталей остекления самолета. Погрешность определения размеров дефектов составляет ± 15 мкм для поперечных дефектов, и до ± 100 мкм для дефектов с характерными поперечными размерами ≤ 60 мкм. Для определения в доверительном интервале точности элементов остекления самолета на наличие поверхностных повреждений и оценки их влияния на безопасность полета был создан макет цифровой голографической камеры. Для снижения погрешности определения размеров в продольном направлении регистрация второй голограммы проводилась под углом в 90 градусов, за счет увеличения разрешающей способности ПЗС матрицы

Ключевые слова

Цифровая голография, элементы остекления самолетов, усталостные дефекты фторорганического стекла

Благодарности

Результаты были получены в рамках реализации государственного задания Министерства образования и науки России, проект № FSWM-2020-0038

DETERMINATION OF THE DIMENSIONS OF SURFACE DEFECTS OF AVIATION GLASS IN THREE-DIMENSIONAL SPACE BY DIGITAL HOLOGRAPHY

Mikhail M. Zinoviev, Nikolay N. Yudin, Pavel V. Pavlov, Viktor V. Dyomin, Igor G. Polovtsev, Ilya E. Kuskov, Igor E. Wolf, Alexander O. Evsin, Alexander A. Balashov, Alexander S. Kostin, Sergey N. Podzivalov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

It is proposed to use the digital holography method to determine the depth and characteristic dimensions of fatigue damage of organofluoride aviation glass. The possibility of this method is shown to determine the characteristic transverse dimensions of surface defects of aircraft glazing parts with a measurement error of ± 15 microns, and longitudinal dimensions (depth of surface defect) with an error of up to ± 100 microns (for defects with characteristic transverse dimensions of ≤ 60 microns). The work carried out and the created layout of the digital holographic camera show the potential possibility of creating a methodology for checking with a given accuracy the elements of the aircraft glazing for surface damage and assessing their impact on flight safety. An increase in the resolution of the CCD matrix can improve the accuracy of determining the error of the transverse dimensions of defects, and the use of special methods for registering holograms of the object under study (for example, registering a second hologram at an angle of 90 degrees) they are able to increase the accuracy of determining the position of the plane of the best focusing and reduce the size error in the longitudinal direction

Keywords

Digital holography, aircraft glazing elements, fatigue defects of organofluorine glass.

Acknowledgements

The results were obtained as part of the implementation of the state task of the Ministry of Education and Science of Russia, the project № FSWM-2020-0038

При разработке основных конструкций планера самолета, учитывается надежность используемых материалов, одним из основных элементов является остекление. Самый

распространённый материал, используемый как в гражданских, так и в военных самолетах, это фторорганическое авиационное стекло [1]. Поверхностные дефекты типа «серебро» значительно снижают прочность органического стекла [2, 3], используемого для остекления самолетов, данные дефекты образуются в органическом стекле в результате взаимодействия с ультрафиолетовым излучением и механических нагрузок.

Целью настоящей работы является апробация метода цифровой голографии для определения глубины усталостных поверхностных дефектов типа «серебро» авиационного органического стекла, вызванных циклическими механическими перегрузками, а также воздействием агрессивных веществ.

Для проведения исследований из органического стекла марки СО-120 был подготовлен образец с геометрическими размерами 120x20x10 мм, для создания на поверхности исследуемого образца стекла дефектов типа «серебро», в течение 30 секунд по всей поверхности образца наносился ацетон, что позволяло имитировать воздействие агрессивных компонент. Для имитации механических воздействий образец подвергался «чистому изгибу» по ISO 178:2010 MOD с созданием в поверхностном слое напряжений 525 кгс/см². В последующем производилась запись цифровых голограмм данного образца.

На передней грани с наличием дефектов, наносилась отметка маркером, для точного определения координаты Z , после чего проводилось восстановление набора голографических сечений по координате z с шагом 10 мкм. Была проведена выборка восстановленных изображений с наиболее характерными поверхностными повреждениями и определение расстояния от матрицы CCD камеры до плоскости наилучшей фокусировки. В исследуемом объеме было выбрано несколько дефектов. Поверхностный дефект 1 с поперечными размерами 70 ± 15 мкм имел глубину 970 ± 160 мкм; поверхностный дефект 2 с поперечными размерами 30 ± 15 мкм имел глубину 140 ± 50 мкм; поверхностный дефект 3 с поперечными размерами 40 ± 15 мкм имел глубину 280 ± 65 мкм. Проведенные исследования наглядно демонстрируют возможность использования метода цифровой голографии для определения характерных поперечных размеров поверхностных дефектов деталей остекления самолета с заданной погрешностью измерения, длины волны регистрации и восстановления 1,06 мкм, положения предмета $Z \approx 70$ мм от регистрирующей матрицы.

Проведённая работа и созданный макет цифровой голографической камеры показали потенциальную возможность создания методики проверки с заданной точностью элементов остекления самолёта на наличие поверхностных повреждений и оценки их влияния на безопасность полёта. Более подробно результаты работы изложены в [4].

Литература

- [1] Mekalina I.V., Bogatov V.A., Trigub T.S., Sentyurin E.G., Aviation organic glass // Proceedings of Russian research institute of aviation materials. – 2013. – V. 14. – Is. 190.
- [2] Mecaline I.V., Aizatulin M.K., Sentjurin E.G., Popov A.A., Features of the influence of atmospheric factors on aviation organic glass. // Proceedings of Russian research institute of aviation materials. – 2018. – V. 11. – Is. 210.
- [3] Akolzin S.V., Frolov A.I., Restoring the performance of heat-resistant aviation glazing during repair and operation // Aviation industry. – 2014. – Is. 1. – P. 21–26.
- [4] Юдин Н.Н., Павлов П.В., Зиновьев М.М., Подзывалов С.Н., Дёмин В.В., Половцев И.Г., Кусков И.Э., Вольф И.Э., Евсин А.О., Балашов А.А., Костин А.С., Оценка усталостных повреждений авиационного фторорганического стекла методами цифровой голографии // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88. – №. 2. – С. 20–26.

**МЕТОДЫ ФОТониКИ И ГОЛОГРАФИИ
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ**

УДК 681.784.8

**СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННОГО
И МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДОВ
ДЛЯ ЭНДОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ РАКА ВНУТРЕННИХ ОРГАНОВ**

**Кирилл Вадимович Зайченко*, Борис Симхович Гуревич*, Андрей Владимирович Беляев*,
Виталия Игоревна Святкина****

**Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В работе рассмотрена авторская концепция создания нового семейства эндоскопов, позволяющих передавать с минимальными потерями спектральную и пространственную информацию о наблюдаемых внутренних органах для получения более полных данных о наступлении и развитии онкологических заболеваний. Предложена новая структура эндоскопа, предусматривающая одновременную передачу данных о внутреннем органе с помощью видеокамеры и многоспектрального волоконно-оптического датчика. В таком эндоскопе телевизионное изображение дает высокое пространственное разрешение, а оптоволоконное – более объемную спектральную и градационную информацию. Таким образом, реализация предложенного принципа позволит расширить возможности проведения диагностики различных патологий, в том числе и на ранних стадиях их развития, за счет получения новой ранее недоступной информации

Ключевые слова

Гибридный эндоскоп, многоспектральный датчик, телевизионная камера, пространственная информация, спектральная и градационная информация, рак внутренних органов, ранняя диагностика

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки РФ, госзадание № 075–00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011

**MUTUAL APPLICATION OF TELEVISION AND MULTISPECTRAL METHODS FOR
ENDOSCOPIC DIAGNOSTICS OF THE INTERNAL ORGAN CANCER**

Kirill V. Zaichenko, Boris S. Gurevich, Andrey V. Belyaev, Vitaliy I. Svyatkina

**Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

***Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract

The author's concept of the creation of new branch of endoscopes which provide transmission with minimum losses the spectral and spatial data regarding the observed internal organs in order to obtain the complete knowledge of the oncologic diseases start and development, has been considered in the present work. The new endoscope structure has been proposed which foresees the simultaneous transmission of data about the internal organ by means of video camera and multispectral fiber glass probe. In this structure the television image provides the higher spatial resolving power whereas the fiber glass – bigger spectral and gray scale information. Hence, the realization of the proposed principle allows to extend the possibilities of different pathologies diagnostics, including the cancer of internal organs, at expense of new information achievement, including that at early stages of their development

Keywords

Hybrid endoscope, multispectral probe, television camera, spatial information, spectral and gray scale information, cancer of internal organs, early diagnostics

Acknowledgements

The work has been supported by Education and Science Ministry of Russian Federation, State task No. 075-00761-22-00, project No. FZZM-2022-0011

Введение

В современных эндоскопах для наблюдения изображений внутренних органов и тканей, а также их фрагментов для более детального обнаружения и изучения различных патологий, в частности, и онкологии, применяются эндоскопы с видеокамерами,

передающие телевизионное изображение объекта исследования на экран монитора. Достоинством такого метода является получение достаточно полной пространственной информации во время исследования. Однако при использовании такого подхода происходит потеря значительной части информации о спектре отражения света от внутреннего органа или ткани, хотя утраченная информация может иметь важное диагностическое значение. Объясняется это тем, что общий объем информации, содержащейся в изображении, пропорционален количеству спектральных интервалов, разрешаемых системой обработки изображений [1]. Изображения, полученные с помощью телевизионного метода съемки, содержат лишь комбинацию трех основных цветов – красного, зеленого и синего (RGB-изображения), то есть три спектральных линии с различными комбинациями интенсивности. Все остальные длины волн, содержащиеся в исходном изображении, на экран монитора не поступают. Поэтому можно считать, что спектральная информация, полученная видеоскопом, примерно в 30 раз меньше, чем в аналоговом оптическом изображении. Это означает, что основная часть информации о спектральных составляющих отдельных элементов изображения не исследуется. Если использовать метод многоспектральной обработки изображений, то это позволит различать до 100 спектральных интервалов.

Принцип минимизации потерь информации

Применения нового авторского вида гибридных эндоскопов, в которых исследуемое изображение фрагмента внутреннего органа или ткани предложено передавать не только видеокамерой, но и с помощью многоспектрального волоконно-оптического датчика, позволяет минимизировать потери спектральной информации. Главным достоинством такого гибридного эндоскопа является сочетание высокой пространственной разрешающей способности, обеспечиваемой телевизионной камерой, с высоким спектральным разрешением, обеспечиваемым многоспектральной обработкой светового пучка, отраженного от внутреннего органа. Это позволит расширить возможности проведения диагностики различных патологий, в том числе и на ранних стадиях их развития, за счет извлечения при исследовании большого объема дополнительной спектральной информации.

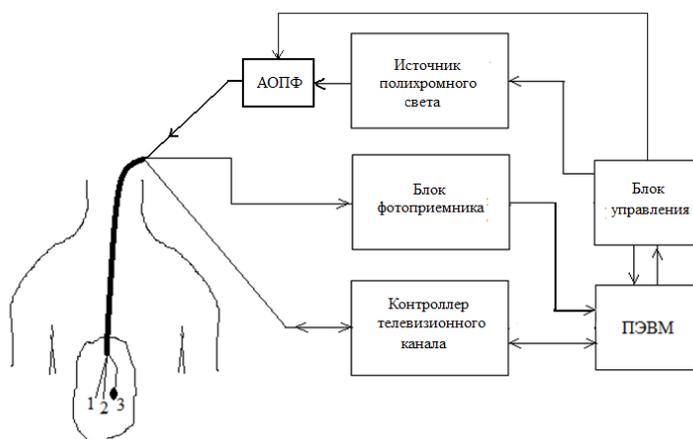


Рисунок. Структурная схема гибридного эндоскопа

Структура нового гибридного эндоскопа

На рисунке приведена структурная схема нового авторского гибридного эндоскопа, реализующая описанный принцип, где обозначены: 1 - волоконный световод подсветки; 2 - оптоволоконный датчик передачи монохромного изображения; 3 – видеокамера.

Поскольку нами поставлена задача одновременного получения при исследовании как можно более полной пространственной и спектральной информации, в схеме рисунка объединены телевизионный и волоконно-оптический методы получения изображений в одном устройстве, которое названо гибридным эндоскопом.

Работа такого эндоскопа происходит следующим образом. В полость исследуемого органа вводится зонд, содержащий волоконный световод подсветки 1 и оптоволоконный датчик 2 с регулируемым микроприводом, а также миниатюрная видеокамера 3 с соответствующим кабелем. По телевизионному изображению от видеокамеры на экране монитора выбирается фрагмент органа, представляющий интерес для анализа, в этом фрагменте выбирается небольшой участок, изображение которого будет выведено оптоволоконным датчиком. Сигнал с телевизионной камеры через контроллер поступает на ПЭВМ, где с помощью соответствующего программного обеспечения выдается сигнал настройки волоконно-оптического датчика. С помощью микропривода конец волоконного световода подсветки с микролинзой направляется в сторону этого участка. Спектральный состав излучения подсветки выбирается исходя из принципа, описанного в работе [2]. Изменение длины волны освещающего света осуществляется программным способом. Отраженный свет попадает на вход оптоволоконного датчика, изображение с которого выводится для анализа на специализированный многоэлементный фотоприемник.

После описанного наблюдения выбранного участка при необходимости можно выбрать следующий участок исследуемого органа для анализа и повторить все описанные выше процедуры. Таким образом, будет собрана с минимальными потерями визуальная информация об объекте исследования. Более подробно описанные процедуры могут быть проанализированы в соответствии с концепцией многокритериальной оптимизации, если присвоить различным видам информации соответствующие иерархические весовые коэффициенты

Таким образом, два изображения – телевизионное и оптоволоконное – дополняют друг друга. Телевизионное изображение дает высокое пространственное разрешение, а оптоволоконное – более объемную спектральную и градиционную информацию.

Заключение

Рассмотренный выше принцип построения гибридного эндоскопа может быть применен в гастроскопии, бронхоскопии, колоноскопии, лапароскопии и во всех иных возможных областях, где видеоинформация об исследуемом органе позволяет диагностировать наличие патологий, особенно онкологии.

Литература

- [1] Zaichenko K.V., Gurevich S.B., Gurevich B.S. Application of optical freedom degrees principle to acousto-optic devices //Physics Procedia. – 2015. – V. 70. – P. 774–778.
- [2] Шаповалов В.В., Гуревич Б.С., Колесов И.А., Андреев С.В., Беляев А.В. Источник света с произвольно регулируемым спектральным составом для биомедицинских спектральных анализаторов // Биомедицинская электроника. – 2009. – № 11. – С. 16–20.

УДК 681.784.8

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФОТОНИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Кирилл Вадимович Зайченко*, Борис Симхович Гуревич*, Сергей Александрович Рогов**,
Анна Алексеевна Кордюкова*, Василий Михайлович Колесов***

**Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

***Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия*

****Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В работе рассмотрено применение современных и перспективных методов фотоники для обработки биоэлектрических сигналов (БЭС) на базе оптических и акустооптических устройств. Основные трудности применения этих методов связаны с тем, что исследуемые сигналы являются низкочастотными и требуется разработка специальных мер адаптации устройств для их обработки. Предложено вводить информационный БЭС в акустооптическую систему обработки с временным интегрированием с использованием метода модуляции низкочастотным сигналом высокочастотной ЛЧМ-несущей. Также используется авторский метод предварительного сжатия БЭС для их перевода в высокочастотную область и ввода в акустооптическую систему обработки с пространственным интегрированием. Оптическая предварительная обработка БЭС может также осуществляться с помощью жидкокристаллических матриц

Ключевые слова

Биоэлектрические сигналы, оптическая обработка, акустооптические спектроанализаторы, конвольверы и корреляторы, жидкокристаллические матрицы, сжатие информационных сигналов

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки РФ, госзадание № 075–00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011

APPLICATION OF PHOTONICS METHODS FOR PROCESSING BIOELECTRIC SIGNALS

Kirill V. Zaichenko, Boris S. Gurevich, Sergey A. Rogov, Anna A. Kordyukova, Vasily M. Kolesov

**Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

***Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia*

****Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract

The application of modern and perspective photonics methods on the basis of optical and acousto-optic devices for the processing of bioelectric signals (BES) have been considered. The basic difficulties of these methods application are connected with the fact that the studied signals are of low frequencies, and development of special actions are required for the processing devices adapting. It has been proposed to introduce into acousto-optic processing system with time integration the BES using method of high frequency LFM- carrier modulation by low frequency signal. On a level with that the method of the BES preliminary compression has been proposed for BES transfer into high frequency area and its introducing into acousto-optic processing system with space integration. The BES optical preliminary processing can also be performed due to liquid crystal arrays application

Keywords

Bioelectric signals, optical processing, liquid crystal arrays, acousto-optic spectrum analyzers, convolvers and correlators, liquid crystal arrays, information signals compression

Acknowledgements

The work has been supported by Education and Science Ministry of Russian Federation, State task No. 075-00761-22-00, project No. FZZM-2022-0011

Введение

Биоэлектрические сигналы (БЭС) характеризуют электрическую активность различных клеток, тканей и органов живого организма, в том числе сердечно-сосудистой

системы, головного мозга, центральной нервной системы и мышц человека. Можно отметить две особенности БЭС – низкие частоты (от единиц до сотен и тысяч Гц) и сравнительно низкие значения амплитуды (единицы - сотни мкВ). При этом отношение сигнал/шум зачастую оказывается невысоким и приходится применять специальные меры для выделения полезного сигнала на фоне шумов и помех. Такие меры разрабатываются при реализации различных методов обработки БЭС.

Используемые методы фотоники

К современным и перспективным методам обработки БЭС можно отнести такие методы фотоники, как оптическая и акустооптическая обработка сигналов. К их достоинствам можно отнести простоту и малые габариты реализующих устройств, низкое энергопотребление и высокое быстродействие. При обработке низкочастотных (НЧ) сигналов, каковыми являются БЭС, быстродействия цифрового процессора безусловно достаточно. Однако в некоторых специфических случаях, как, например [1], когда необходимо обойтись без ЭВМ для уменьшения веса и габаритов устройства спектральной обработки БЭС, становится актуальным применение оптических и акустооптических средств. В ранних работах, посвященных оптической обработке НЧ-сигналов, предлагалось использовать устройства ввода в виде записи сигналов на фото пленке или трубки «Титус» [2]. Также предлагались акустооптические устройства с пространственным и временным интегрированием, в которых НЧ-сигнал модулирует высокочастотную несущую [3].

Обработка БЭС акустооптическими устройствами с временным интегрированием

Большой интерес представляет использование акустооптических (АО) устройств для обработки БЭС [4, 5]. Поскольку они работают на высоких частотах, то ввод БЭС в акустооптическую систему можно осуществлять, с помощью модуляции высокочастотной несущей НЧ-сигналом. В акустооптических корреляторах и анализаторах спектра с временным интегрированием на их выходе может быть получена огибающая корреляционной функции или спектр низкочастотной модулирующей функции [6, 7]. Достоинством схем с временным интегрированием является возможность обработки протяженных сигналов, какими часто оказываются записи БЭС. Анализатор спектра с временным интегрированием является достаточно сложным устройством, а коррелятор или конвольвер с временным интегрированием позволяют получать лишь небольшие, ограниченные временем памяти АО-ячеек Брэгга относительные сдвиги сигналов, участвующих в процессе корреляции. Это существенно затрудняет создание важной для практического применения корреляционной системы, осуществляющей поиск короткого фрагмента в длинном сигнале.

Обработка БЭС акустооптическими устройствами с пространственным интегрированием

Более простыми являются АО-корреляторы и АО-анализаторы спектра с пространственным интегрированием. Их недостатком является невозможность обработки сигналов, длительность которых превышает время памяти АО-ячейки Брэгга - не более нескольких десятков микросекунд. Эту трудность можно обойти, подавая в систему НЧ-сигнал, сжатый во времени [8, 9]. При этом полоса сигнала расширится в число раз, равное коэффициенту сжатия, но, поскольку АО-устройства имеют широкую полосу пропускания, это вполне допустимо, даже если сжатым сигналом еще и модулировать

высокочастотную несущую. Сжатие БЭС можно осуществлять, сохраняя его в буферном запоминающем устройстве и последующим считывании с него с большей скоростью. Так, для поиска фрагмента НЧ-сигнала длительностью 10 мс в протяженном сигнале с полосой 2 КГц, можно сжать его в 1000 раз. Тогда длительность фрагмента сигнала составит 10 мкс и поместится на опорном транспаранте коррелятора с длиной, соответствующей времени памяти АО-модулятора. Полоса сжатого сигнала составит 2 МГц. Устройствам АЦП, ЦАП и буферной памяти при таких параметрах сигналов можно легко реализовать. В простом АО-корреляторе с опорным транспарантом на выходе фотоприемника формируется огибающая корреляционной функции в зависимости от времени. Используя набор опорных транспарантов в многоканальном корреляторе, можно реализовать вейвлет-анализ протяженного БЭС с использованием материнского вейвлета, зависящего от двух параметров [7].

Применение жидкокристаллических матриц

В настоящее время одним из перспективных оптических устройств ввода информации в систему обработки являются жидкокристаллические (ЖК) матрицы с электронным управлением [10]. Рассмотрим возможности использования таких матриц при вводе БЭС в систему обработки. Поскольку число отсчетов в реализации БЭС зачастую невелико, вся информация о сигнале со сверхвысоким разрешением (БЭС СВР) [4] длительностью 1с с полосой 2КГц, содержится в 4000 отсчетов. ЖК-матрицы с таким числом пикселей в строке существуют. Используя несколько строк матрицы, можно вводить в оптическую систему несколько сигналов для их параллельной обработки. Для сигналов с большим числом отсчетов (до нескольких миллионов) можно применить их растровый ввод в ЖК-матрицу, а более длинные сигналы можно обрабатывать отдельными фрагментами. Поскольку время на оптическую обработку и регистрацию сигналов на выходе системы гораздо меньше длительности БЭС, пропуски во вводе сигналов из-за обработки предыдущих фрагментов будут малы. Кроме того, при использовании двух поочередно работающих таких систем, пропусков в обработке можно полностью избежать.

На основе оптических устройств ввода на ЖК-матрицах можно создавать одноканальные и многоканальные анализаторы спектра, корреляторы и конвольверы сигналов с пространственным интегрированием, в том числе, и для обработки протяженных сигналов. В этих устройствах не требуется использовать модуляцию высокочастотной несущей НЧ-сигналом. Таким образом, применение ЖК-матриц с электронным управлением является перспективным для ввода БЭС в оптические и акустооптические системы обработки информации.

Заключение

Применение перечисленных методов оптической и акустооптической обработки БЭС, а также их совместное использование в различных комбинациях, позволит в отдельных специфических случаях существенно упростить как сами процедуры обработки сигналов, так и уменьшить массогабаритные характеристики реализующих устройств.

Литература

[1] Zaichenko K., Gurevich B., Kordyukova A. A. Method of Reliable Electrocardiographic Control of Ischemia Appearance in Investigations with Experimental Animals //2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2021. – P. 0078-0081.

- [2] Frances T.S., Jutamulia S. Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks. – Wiley-Interscience, 1992. – V. 6.
- [3] Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические сигнальные процессоры // М.: Сайнс-Пресс. – 2002. – Т. 3.
- [4] Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Early diagnostics of ischemia by means of electrocardiographic signals processing using acousto-optic Fourier processors with time integration // Proceedings of SPIE. – 2019. – V. 11075. – P. 110751U.
- [5] Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Спектральная обработка биоэлектрических сигналов // Медицинская техника. – 2021. – №1. – С. 12–14.
- [6] Ли Дж., Вандерлюгт Э., Акустооптические методы обработки сигналов и вычислений // ТИИЭР. – 1989. – Т. 77, – № 10. – С. 158–193.
- [7] Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Акустооптическая вейвлет-обработка биоэлектрических сигналов // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, – №. 1. – С. 36–38.
- [8] Zaichenko K.V., High accuracy adaptive frequency measurements for low signals in acoustic optical processors // Proceedings of SPIE. – 1993. – V. 2051. – P. 732–738.
- [9] Аристархов Г.М., Воробьев А.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф., Зайченко К.В., и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. М.: Радиотехника. 2020. 504 с.
- [10] Kuzmin M.S., Rogov S.A. Spatial light modulator based on video projector matrix for information processing systems // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2013. – V. 22. – Is. 4. – P. 261–266.

УДК535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРНОЙ ВАЗОДИЛАТАЦИИ СОСУДОВ МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

Анжелика Вадимовна Белавенцева*, Наталья Петровна Подолян*, Максим Александрович Вольнский**, Валерий Викторович Зайцев***, Анастасия Владимировна Саковская****, Олег Викторович Мамонтов*, Роман Владимирович Ромашко*, Алексей Александрович Камшилин*

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

**Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

***ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия

****Институт терапии и инструментальной диагностики ФГБОУ ВО ТГМУ Минздрава России, г. Владивосток, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования реакции кожного кровотока на локальный нагрев методом визуализирующей фотоплетизмографии, позволяющим неинвазивно оценить амплитудно-временные параметры микроциркуляции в зависимости от тонуса сосудов. Показано, что предложенный метод достоверно отражает функцию механизмов регуляции периферического сосудистого сопротивления, что имеет большое прогностическое значение для выявления первичных сердечно-сосудистых заболеваний

Ключевые слова

Микроциркуляция, фотоплетизмография, терморегуляция, эндотелиальная дисфункция, перфузия

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-15-00265

THE STUDY OF THERMOREGULATORY VASODILATION OF BLOOD VESSELS BY IMAGING PHOTOPLETHYSMOGRAPHY

Anzhelika V. Belaventseva, Natalia P. Podolyan, Maxim A. Volynsky, Valery V. Zaytsev, Anastasiia V. Sakovskaia, Oleg V. Mamontov, Roman V. Romashko, Alexei A. Kamshilin

*Institute for Automation and Control Processes of FEB RAS, Radio St., Vladivostok, Russia

**ITMO University, St. Petersburg, Russia

***Almazov Federal Heart, Blood and Endocrinology Center, Akkuratova St., St. Petersburg, Russia

****Institute of Therapy and Instrumental Diagnostics, Pacific State Medical University, Vladivostok, Russia

Abstract

The paper presents the results of the study of the response of skin blood flow to local heating by a method of imaging photoplethysmography, which allows noninvasively assess the amplitude-time parameters of microcirculation depending on vascular tone. It has been shown that the proposed method reliably reflects the function of the mechanisms of peripheral vascular resistance regulation, which is of great prognostic value for the detection of primary cardiovascular diseases

Keywords

Microcirculation, photoplethysmography, thermoregulation, endothelial dysfunction, blood perfusion

Acknowledgements

The Russian Science Foundation financially supported the research (Grant 21-15-00265)

Введение

Работу системы микроциркуляции обеспечивает целый ряд функциональных процессов, регулируемых гормональной и вегетативной нервной системой. Важными эндогенными регуляторами сердечно-сосудистой системы, синтезируемыми в клетках эндоте-

лия являются вазодилататоры и вазоконстрикторы [1]. При любых патологических изменениях в сосудах выявляют дисбаланс секретируемых эндотелием оксида азота (NO) и других биологически активных веществ.

Для оценки нарушений микроциркуляции крови при различных сердечно-сосудистых патологиях, в том числе и эндотелиальной дисфункции, в медицинской практике широко применяется метод тепловых проб. Среди неинвазивных оптических методов оценки реакции кровотока на локальный нагрев широко используют метод лазерной доплеровской флуометрии (ЛДФ) [2]. Основным недостатком данного метода является низкая воспроизводимость и чувствительность результатов к условиям проведения исследования. Кроме того, датчик ЛДФ оценивает параметры кровотока в одной точке контакта с кожей. В рамках данной работы предлагается использовать метод визуализирующей фотоплетизмографии (ВФПГ), который позволяет оценить изменения перфузии крови в ответ на локальный нагрев бесконтактно, что значительно повышает достоверность полученных результатов [3].

Метод визуализирующей фотоплетизмографии

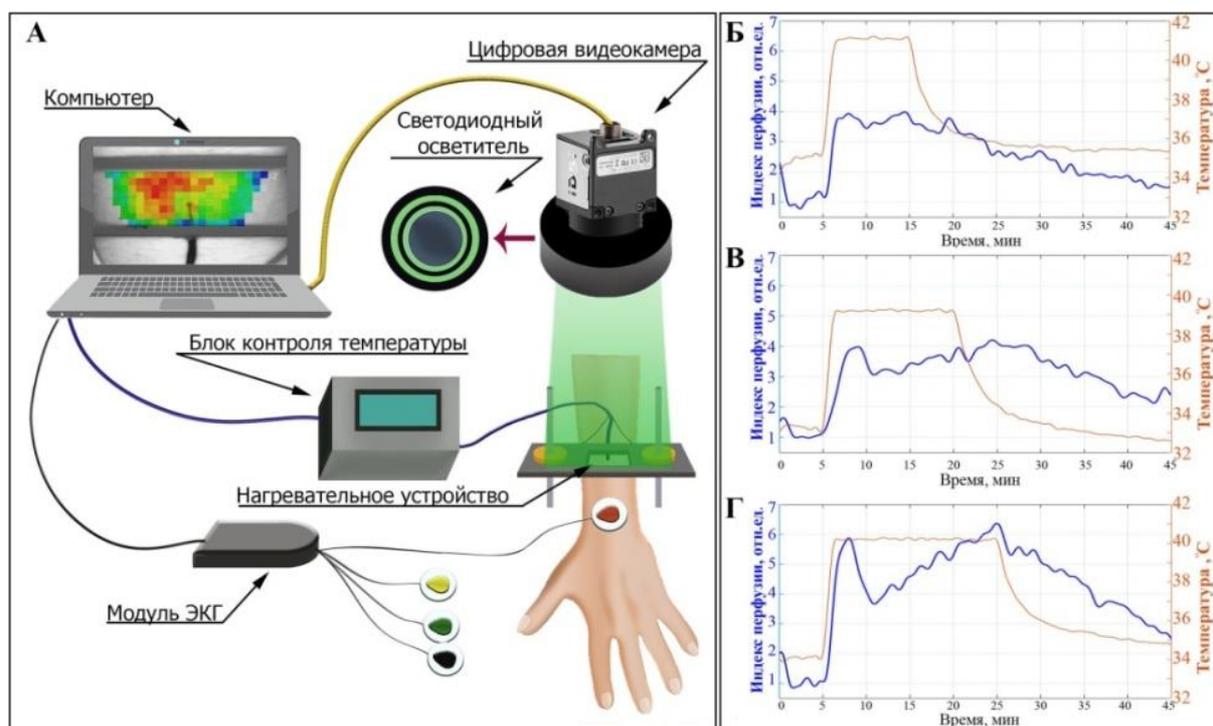


Рисунок. Блок-схема измерительной системы (А). Отклик перфузии на локальный нагрев при различной его длительности (Б, В, Г). Синие кривые показывают изменение индекса перфузии, а красные – температуры кожи

Схема измерительной системы показана на рисунке (А). На внешнюю область предплечья под контролируемым небольшим давлением накладывалась стеклянная пластина с прозрачным токопроводящим слоем, обеспечивающим локальный нагрев исследуемого участка. Эта область равномерно освещалась зелёными светодиодами ($\lambda = 530 \pm 25$ нм), и изображение в отражённом свете записывалось цифровой видеокамерой. Хорошо известно [4], что именно зелёный свет приобретает наибольшую модуляцию на частоте сердцебиений после взаимодействия с биологической тканью, содержащей кровеносные сосуды несмотря на то, что глубина его проникновения в кожу не превышает

0,5 мм. В рамках альтернативной модели формирования фотоплетизмографического сигнала эта модуляция обусловлена механическим изменением плотности капилляров в дерме вследствие пульсаций близлежащих артерий и артериол [5]. Таким образом, капиллярное русло оказывается распределённым преобразователем пульсаций глуболежащих артерий в модуляцию света на частоте сердцебиений. Поскольку амплитуда артериальных пульсаций определяет перфузию крови в исследуемой области (чем больше амплитуда пульсаций, тем выше перфузия), то амплитуда модуляции света на частоте сердцебиений характеризует локальную перфузии исследуемого участка [6]. Соответственно, пространственные распределения амплитуды модуляции изображения на частоте сердцебиений отражают распределение перфузии.

Отраженный свет регистрировался монохромной 8-разрядной видеокамерой (UI-3060CP-M-GL), в процессе видеозаписи, которая проводилась синхронно с записью электрокардиограммы для последующего надёжного выделения модуляции на частоте сердцебиений. Видеокадры с фокусированными изображениями освещенного участка кожи записывались на персональный компьютер через универсальную последовательную шину (USB) совместно с электрокардиограммой и обрабатывались с помощью специального программного обеспечения, реализованного на платформе Matlab. Исходный сигнал каждого пикселя изображения состоит из переменной составляющей (AC), модулированной на частоте сердцебиений, и медленно меняющейся (DC), которая относится к низкочастотным модуляциям, обусловленными процессами дыхания и действиями нервной системы. Для построения карт распределения перфузии мы использовали отношение AC/DC, которое уменьшает влияние неоднородности освещения и рельефа кожи на вычисляемый индекс перфузии [6]. Для уменьшения влияния бликов от верхнего слоя эпидермиса и нагревательного элемента использовался метод поляризационной фильтрации, реализованный посредством установки тонкопленочных поляризаторов со взаимно ортогональной ориентацией после светодиодов и перед камерой.

При обработке изображений для получения достоверного сигнала пульсовой волны в каждом пикселе начало каждого импульса нормализованного сигнала AC/DC совмещалось с соответствующим R-пиком электрокардиограммы и затем пульсовые волны в 15 последовательных кардиоциклах усреднялись для вычисления индекса перфузии в каждом пикселе [4, 6]. Индекс перфузии рассчитывался, как разность максимального и минимального значения, усреднённого по 15 кардиоциклам отношения AC/DC.

Локальный нагрев кожи осуществлялся прозрачной токопроводящей пластиной, до температуры $41 \pm 1^\circ\text{C}$ и контролировался компьютером. Токопроводящий слой не контактировал с кожей. Для обеспечения теплопроводности между стеклянной пластиной и кожей наносили вазелин. С помощью термопары, расположенной между пластиной и кожей, контролировалась температура последней.

Все измерения проводились в затемненной лаборатории без внешнего освещения, при температуре окружающей среды 23°C . Обследовано 6 здоровых добровольцев, в возрасте 44 ± 6 лет. Для каждого из них проведено по три теста длительностью 7, 15 и 20 минут (рисунок б, в и г). Исследования выполнены с разрешения междисциплинарного комитета по этике ФГБОУ ВО ТГМУ Минздрава России, протокол №10 от 21.06.2021.

Результаты и выводы

Локальный нагрев кожных покровов после включения нагревательной пластины вызывает вазодилатацию, обусловленную аксонным рефлексом, что приводит к быстрому росту перфузии. Было замечено, что возрастание перфузии зависит как от начальной температуры кожи, так и от разницы температуры её нагрева. Проведенный регрессионный

анализ показал достоверную положительную корреляцию роста перфузии с разницей температур ($r=0,92$, $p<0,001$) и отрицательную с начальной температурой ($r=-0,90$, $p<0,001$). Обнаружено, что форма сигнала сильно зависит от длительности нагрева. Продолжительный нагрев, вслед за падением перфузии и появлением локального минимума на кривой, вызывает увеличение кровотока, что приводит к росту перфузии и появлению второго максимума (рисунок в и г). Такой рост перфузии связан с активацией эндотелиального компонента вазодилатации NO. Полученные кривые соответствуют характерной зависимости реакции кожного кровотока на локальный нагрев. Аналогичные зависимости были получены при исследованиях с помощью ЛДФ [2]. Таким образом, предложенный метод ВФПГ достоверно отражает функцию механизмов регуляции периферического сосудистого сопротивления, что может в перспективе позволить исследовать различные физиологические нарушения, вызванные эндотелиальными патологиями.

Литература

- [1] Gimbrone Jr M. A., García-Cardena G. Endothelial cell dysfunction and the pathobiology of atherosclerosis //Circulation research. – 2016. – V. 118. – Is. 4. – P. 620–636.
- [2] Cracowski J.L., Minson C., Salvat-Melis M., and Halliwill J. Methodological issues in the assessment of skin microvascular endothelial function in humans //Trends in pharmacological sciences. – 2006. – V. 27. – Is. 9. – P. 503–508.
- [3] Volynsky M.A., Margaryants N.B., Mamontov O.V., and Kamshilin A.A. Contactless monitoring of microcirculation reaction on local temperature changes //Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – Is. 22. – P. 4947.
- [4] Cui W., Ostrander L. E., Lee B. Y. In vivo reflectance of blood and tissue as a function of light wavelength //IEEE transactions on biomedical engineering. – 1990. – V. 37. – Is. 6. – P. 632-639.
- [5] Kamshilin, A.A., Nippolainen, E., Sidorov, I. S., Vasilev, P.V., Erofeev, N.P., Podolian, N.P., Romashko, R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography //Scientific reports. – 2015. – V. 5. – Is. 1. – P. 1-9.
- [6] Lyubashina, O.A., Mamontov, O.V., Volynsky, M.A., Zaytsev, V.V., & Kamshilin, A.A. Contactless assessment of cerebral autoregulation by photoplethysmographic imaging at green illumination //Frontiers in neuroscience. – 2019. – V. 13. – P. 1235.

УДК 535.417

ПРИМЕНЕНИЕ ВНЕОСЕВОЙ И НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗИСТИВНОСТИ ЖИВЫХ КЛЕТОК К ФОТОДИНАМИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Андрей Владимирович Белашов*, Анна Александровна Жихорева*, Татьяна Николаевна Беляева**, Илья Константинович Литвинов**, Анна Владимировна Салова**, Ирина Владимировна Семенова*, Елена Сергеевна Корнилова*, Олег Святославович Васютинский*

*Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

**НИИ Цитологии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа эффективности фотодинамического воздействия (ФДВ) для инициации гибели живых клеток трех различных линий с помощью методов фазового имиджинга. Было проведено определение оптических и морфологических параметров клеток в различных состояниях с помощью традиционной внеосевой голографической микроскопии с использованием когерентного лазерного излучения, а также с помощью низкокогерентной голографии с использованием уравнения переноса интенсивности. Было установлено, что среди клеток линий HeLa, A549 и 3T3 наименее резистивными оказываются клетки линии HeLa, что проявляется в возможности инициации клеточной гибели при сравнительно низких дозах ФДВ

Ключевые слова

Цифровая голографическая микроскопия, фотодинамическое воздействие, фазовое изображение

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект #21-72-10044

APPLICATION OF OFF-AXIS AND LOW-COHERENT PHASE MICROSCOPY FOR ANALYSIS OF CELLS RESISTANCE TO PHOTODYNAMIC TREATMENT

Andrey V. Belashov, Anna A. Zhikhoreva, Tatyana N. Belyaeva, Ilya K. Litvinov, Anna V. Salova, Irina V. Semenova, Elena S. Kornilova, Oleg S. Vasyutinskii

*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

**Institute of Cytology of RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract

We report an analysis of resistance of cells of three cell lines (HeLa, A549 and 3T3) to photodynamic treatment (PDTr) using two phase imaging approaches. Evaluation of optical and morphological parameters of cells at different states (e.g. live, necrotic, apoptotic) was performed using off-axis digital holographic microscopy with coherent probe laser radiation and using transport of intensity approach allowing for phase imaging using low-coherent light. It was shown that among the three cell lines HeLa cells are the least resistant to PDTr with Radachlorin photosensitizer

Keywords

Digital holographic microscopy, photodynamic treatment, phase imaging

Acknowledgements

Financial support from Russian Science Foundation under the grant #21-72-10044 is gratefully acknowledged

Введение

Исследование токсичности воздействия различных препаратов на живые клетки *in vitro* является одной из самых актуальных тем в современной цитологии. Для этих целей используются флуоресцентные маркеры, позволяющие определять состояние живых клеток с помощью конфокальной флуоресцентной микроскопии или проточной цитометрии. Недостатком такого подхода является невозможность непрерывного мониторинга клеток без оказания на них негативного воздействия с помощью самих

инструментов мониторинга. Методы же фазового имиджинга позволяют получать важную количественную информацию о морфологических и оптических параметрах клеток без введения в них дополнительных красителей и обеспечивают возможность мониторинга.

Используемые методы и подходы

Для детектирования состояния клеток были использованы два оптических метода, позволяющие восстановить фазовое распределение плоской волны, прошедшей через исследуемый объект: внеосевая цифровая голографическая микроскопия [1] и уравнение переноса интенсивности [2], предполагающее регистрацию и дальнейший численный анализ двух изображений исследуемого объекта с небольшой дефокусировкой образца. Было установлено, что оба метода позволяют с приемлемой точностью оценивать морфологические параметры живых и фиксированных клеток. Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. С одной стороны метод внеосевой цифровой голографии позволяет произвести восстановление фазового изображения из единственной интерференционной картины с использованием двумерного Фурье преобразования, однако качество восстановленного фазового изображения может оказаться недостаточно высоким из-за присутствия когерентного шума. С другой стороны, анализ двух дефокусированных изображений объекта с помощью уравнения переноса интенсивности позволяет получить более качественное фазовое изображение, хотя требование регистрации двух дефокусированных изображений несколько уменьшает временное разрешение этого подхода. Была проведена оптимизация этого метода и найдены оптимальные условия регистрации набора дефокусированных изображений клеток с помощью микроскопа. Установлено, что оба метода позволяют идентифицировать живые, некротические и апоптотические клетки в результате анализа их среднего фазового набега, сухой массы, объема, средней высоты и динамики изменения этих параметров после фотодинамического воздействия.

Результаты и заключение

В ходе экспериментального исследования изменения оптических и морфологических параметров клеток линий HeLa, A549 и 3T3 было установлено, что апоптоз, некроз и вторичный некроз клеток линии HeLa запускается при сравнительно низких дозах воздействия. Для инициации гибели псевдонормальных клеток линии 3T3 требуется осуществлять генерацию активных форм кислорода в намного больших дозах. Оба метода фазового имиджинга свидетельствуют об увеличении среднего фазового набега при гибели клеток путем апоптоза, и уменьшении при запуске процесса некроза. Когерентный шум заметно ухудшает качество восстановленного фазового изображения, но его влияние на определение среднего фазового набега, объема и сухой массы клеток оказывается незначительным. Для более точного определения площади мембраны, индекса сферичности клеток некоторых других морфологических параметров предпочтительно использовать уравнение переноса интенсивности для минимизации когерентного шума.

Литература

- [1] Belashov A.V. et al. Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment in vitro by means of digital holographic microscopy //Biomedical optics express. – 2019. – V. 10. – Is. 10. – P. 4975-4986.
- [2] Zuo C. et al. Transport of intensity equation: a tutorial //Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – V. 135. – P. 106187.

УДК 616.12-073

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Илья Владимирович Красников, Алексей Юрьевич Сетейкин, Бернхард Рот

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация

Моделирование методом Монте-Карло распространения света в рассеивающих и поглощающих средах уже много лет является золотым стандартом для изучения взаимодействия света с биологическими тканями и используется в самых разных случаях. Взаимодействие фотонов со средой моделируется на основе ее оптических свойств и исходного приближения фазовой функции рассеяния. В работе представлен краткий обзор основных подходов математического моделирования и аспектов взаимодействия оптического излучения с биологическими тканями

Ключевые слова

Оптическое излучение, поглощение, рассеивание, моделирование, биологические ткани, метод Монте-Карло

MODERN APPROACHES TO THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS IN BIOMEDICAL RESEARCH

Ilya V. Krasnikov, Alexey Yu. Seteikin, Bernhard Roth

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract

Monte Carlo simulation of the propagation of light in scattering and absorbing media has been the gold standard for studying light with biological tissues for many years and is used in a wide variety of cases. The interaction of photons with encountered models based on its optical properties is the initial approximation of the scattering function. The paper presents a brief overview of the main approaches and aspects to mathematical modeling of the interaction of optical radiation with biological tissues

Keywords

Optical radiation, absorption, scattering, modeling, biological tissues, Monte Carlo method

Введение

В области оптической визуализации можно ожидать такого же прорыва неинвазивных диагностических методов, который был обеспечен в свое время рентгеновской и компьютерной томографией, благодаря использованию неионизирующего излучения и его неинвазивности [1]. Спектроскопия диффузного отражения, спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона, дифракционная оптическая томография, рамановская томография, флуоресцентная томография, оптическая микроскопия, оптическая когерентная томография и фотоакустическая визуализация являются одними из широко используемых в современных оптических методах в биомедицине, и их потенциал далеко не полностью изучен [2].

Моделирование распространения оптического излучения в мутных средах основано на процессах поглощения и рассеяния, которые доминируют при распространении света в биологических тканях. Обычный подход к моделированию распространения света в среде состоит в использовании уравнения переноса излучения [2]. Эффективные решения или приближения этого уравнения для гетерогенной среды (ткани) все еще остаются открытым вопросом [3]. В настоящее время проводится интенсивный поиск комплексных инструментов моделирования, учитывающих все аспекты самой системы и все соответствующие воздействия окружающей среды [4]. Тенденция указывает на использование анатомически более реалистичных моделей органов и развитие более

удобных инструментов моделирования. В работе [5] показана возможность обнаружения рака щитовидной железы на основе визуализации оптического и теплового отклика среды с использованием метода 3D Монте-Карло. Показано распределение плотности потока и температуры в реалистичной трехмерной модели среды с использованием эндогенных и экзогенных контрастных веществ.

На рисунке представлены результаты моделирования процессов комбинационного рассеяния в растворе β Car+чернила. Математическая модель комбинационного рассеяния основана на принципах моделирования флуоресценции, при этом распространение фотонов возбуждения моделируется классическим алгоритмом Монте-Карло [6]. Результаты моделирования показывают, что оптические свойства раствора бета каротина, изучаемого с помощью комбинационного рассеяния, вносят существенные изменения в профиль обнаруженного сигнала. При этом наблюдается согласованность результатов моделирования и экспериментальных данных для интенсивности пиков в спектре комбинационного рассеяния β -каротина.

Дальнейшее развитие биофотоники лежит в постоянно увеличивающейся вычислительной мощности вычислительных систем и концепций искусственного интеллекта, машинного обучения, глубокого обучения и анализа данных [7].

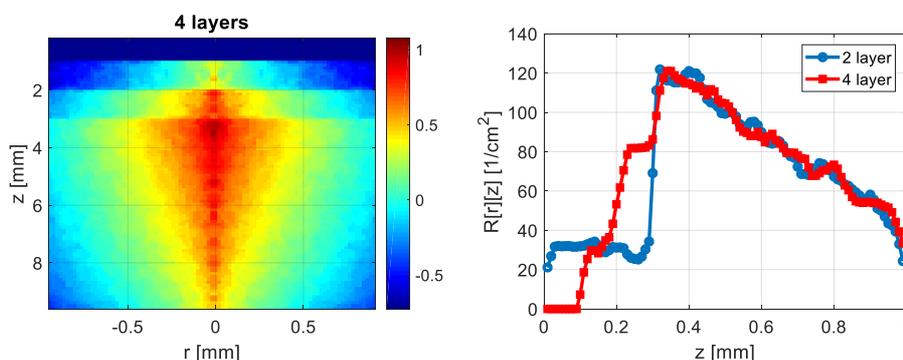


Рисунок. Распределение вероятности поглощения переизлученных рамановских фотонов в четырехслойной среде β Car+чернила (слева).

Плотность потока фотонов комбинационного рассеяния для двух и четырехслойной среды, распределение по глубине (справа)

Литература

- [1] Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика. Т. 1 / Перевод под ред. В. В. Тучина. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 560 с.
- [2] Meglinski I., Doronin A.V. Advanced Biophotonics: tissue optical sectioning. by Tuchin V.V. and Wang R.K. (Taylor Francis, London, 2012). 2012.
- [3] Yun S.H., Kwok S.J.J. Light in diagnosis, therapy and surgery //Nature biomedical engineering. – 2017. – V. 1. – Is. 1. – P. 1-16.
- [4] Jia H. et al. Strategy of boundary discretization in numerical simulation of laser propagation in skin tissue with vascular lesions //Mathematical Biosciences and Engineering. – 2021. – V. 18. – Is. 3. – P. 2455-2472.
- [5] Okebiorun M.O., ElGohary S.H. Optothermal tissue response for laser-based investigation of thyroid cancer //Informatics in Medicine Unlocked. – 2020. – V. 18. – P. 100285.
- [6] Krasnikov I., Seteikin A., Roth B. Advances in the simulation of light–tissue interactions in biomedical engineering //Biomedical Engineering Letters. – 2019. – V. 9. – Is. 3. – P. 327-337.
- [7] Zhrebtsov E. et al. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks //Biomedical optics express. – 2019. – V. 10. – Is. 7. – P. 3545-3559.

УДК 535.4, 532.2, 535.8, 62-529

**ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ КМОП СТРУКТУРЫ
В КОНФОКАЛЬНОМ ЛАЗЕРНОМ ТОМОГРАФЕ**

Константин Андреевич Ляхов*, Василий Аркадьевич Григорьев,
Елизавета Георгиевна Циплакова*****

**Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, г. Москва, Россия*

***ООО "Митлаз-Р", Московская обл., Солнечногорский район, Россия*

****Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

Рассчитана эволюция распределения электрического поля на поверхности КМОП структуры, являющейся элементом предлагаемой схемы конфокального лазерного томографа. Расчёт основан на численном вычислении преобразования Френеля для структуры (прямоугольник) внутри полупрозрачного объекта, движущегося с постоянной скоростью. На основе данных, записанных на голографическом диске, и лазерного луча, отражённого от объекта, определяется результирующее распределение электрического поля на поверхности ПЗС матрицы. Результаты данной работы могут быть интересны специалистам в области неразрушающего контроля и найти применение в соответствующих областях

Ключевые слова

Неразрушающий контроль, конфокальная томография, КМОП, интерферометрия, преобразование Френеля

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации (грант № 075–15-2020-788). Константин Ляхов глубоко благодарен Александру Николаевичу Печень, получателю данного гранта

**ELECTRIC FIELD EVOLUTION ON THE CMOS SURFACE IN CONFOCAL LASER
TOMOGRAPHY**

Konstantin A. Lyakhov, Vasilii A. Grigoriev and Elizaveta G. Tsiplakova

**Steklov Mathematical Institute, Moscow, Russia*

***Mitlas-R Ltd, Solnechnogorsk, Russia*

****ITMO University, St. Petersburg, Russia*

Abstract

Time evolution of the electric field distribution on the CMOS surface of the structure, which is an element of the proposed confocal laser tomograph scheme, is calculated. The calculation is based on the numerical calculation of the Fresnel transformation for totally reflecting rectangular feature inside of translucent object, moving at a constant speed. Based on the data recorded on the holographic disk and the laser beam reflected from the object, the resulting distribution of the electric field on the surface of the CCD matrix is determined. The results of this work may be of interest to specialists in the field of non-destructive control and can find application in the appropriate fields

Keywords

Non-destructive control, confocal tomography, CMOS, interferometry, Fresnel transform

Acknowledgements

This work was funded by Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education (Grant No. 075-15-2020-788). K.L. is very thankful to Alexander N. Pechen, who is the recipient of this grant

Введение

Создание средств неразрушающего контроля является очень важным в связи с бурным развитием методов ранней диагностики различных заболеваний и контроля качества в сельском хозяйстве. Особенностью контроля таких объектов является создание методов оптической диагностики объектов в полупрозрачных средах с пространственным

разрешением порядка десятых долей миллиметра. Результатом таких исследований должно быть обнаружение и распознавание требуемого признака объекта по какому-либо заранее заданному критерию. Поэтому, на наш взгляд, наиболее подходящими методами для такой диагностики являются методы конфокальной лазерной томографии с использованием современных аппаратно-программных средств для получения и обработки оптических изображений.

В данной работе предложена оптическая схема нового голографического томографа, принцип действия которого основан на голограммно-муаровой интерферометрии для полупрозрачных объектов [1–4]. Преимуществом предлагаемого метода является возможность полуавтоматической идентификации структур в полупрозрачных движущихся объектах. Исследованию вопросов при каких параметрах записи микроголограмм Фурье и их воспроизведения идентификация движущихся объектов достижима с приемлемой точностью посвящена данная работа.

Принцип распознавания

В случае совпадения изображений объекта и эталона разность фаз между опорным и сигнальным лучами кратна 2π , распределение количества света по поверхности будет однородным, поэтому в случае совпадения объектов оператор будет наблюдать равномерно засвеченную поверхность. Для того, чтобы снизить требования к количеству записанных голограмм между объектом и линзой устанавливают матовое стекло с характерным размером шероховатостей поверхности достаточным для пренебрежения ошибки в позиционировании объекта меньшей длины волны, используемого излучения. Также известно, что область, в которой может быть расположен эталонный объект, представляет собой некоторый наперед заданный шаровой слой.

Расчёт электрического поля на поверхности КМОП структуры

Предполагая, что вдоль оптического пути между отражающей и регистрирующей поверхностью аппроксимация параксиальной оптики является справедливой, вклад в электрическое поле на поверхности КМОП E_a , соответствующий лазерному излучению, отражённому от элемента объёма внутри объекта ($a=ref$) или голограммы ($a=sig$), может быть связан с полем E_a^0 в непосредственной близости от отражающего элемента объёма с помощью преобразования Френеля

$$E_a(\mathbf{r}_i^\perp, t) = \iiint E_a^0(\tilde{\mathbf{r}}_a^\perp(t), z_a) \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_a^\perp - \mathbf{r}_i^\perp|^2}{\lambda z_{a,c}}\right) r_a \sin(\theta_a) dr_a d\theta_a d\phi_a,$$

где оптическая длина пути от объёма внутри объекта или голограммы до пикселя с координатами $\mathbf{r}_i^\perp = \{x_i, y_i\}$ на поверхности КМОП структуры обозначена как $z_{a,c} = z_c - z_a$, $z_a = r_a \cos\theta_a$. Поскольку восстановление возможных записей осуществляется вращением голографического диска с угловой скоростью ω , а объект движется со скоростью u , преобразование координат рассчитывается следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{r}}_a^\perp(t) = \mathbf{r}_a^\perp - \mathbf{f}_a(t), \quad \mathbf{r}_a^\perp = r_a \sin\theta_a \mathbf{e}_a, \quad \mathbf{e}_a = \{\cos\phi_a, \sin\phi_a\},$$

$$\mathbf{f}_{ref}(t) = u t \mathbf{e}_{ref}, \quad \mathbf{f}_{sig}(t) = \frac{\omega^2 r_{sig} t^2}{2} \sin\theta_{sig} \mathbf{e}_{sig}.$$

В случае рассматриваемой схемы интерферометра Майкельсона рассогласование фазового сдвига, вызванное как неконтролируемым воздействием окружающей среды, так

и работой установки, может быть минимизировано периодически действующим напряжением, подаваемым на фазовый модулятор: $z_{sign:c} = z_0 + Ae^{i\Omega t}$.

Заключение

В данной работе представлен расчёт эволюции электрического поля, которое является результатом интерференции лазерных лучей, отраженных от движущегося объекта и от элементов объёма вращающегося голографического диска, на поверхности КМОП структуры. Движущийся объект является прямоугольником, координаты и площадь которого подлежат идентификации на основе информации, записанной на голографический диск, и плотности её записи. Данной информацией являются микроголограммы Фурье прямоугольников с различными ориентацией внутри полупрозрачного объекта.

Литература

- [1] Stetson K.A., Powell R.L. Hologram interferometry //JOSA. – 1966. – V. 56. – Is. 9. – P. 1161-1163.
- [2] Brandt G.B. Hologram–Moiré Interferometry for Transparent Objects //Applied Optics. – 1967. – V. 6. – Is. 9. – P. 1535-1540.
- [3] Hariharan P., Hegedus Z.S. Four-exposure hologram moiré interferometry and speckle-pattern interferometry: a comparison //Applied Optics. – 1975. – V. 14. – Is. 1. – P. 22-23.
- [4] Tanner L.H. Comments on Hologram–Moiré Interferometry for Transparent Objects //Applied Optics. – 1968. – V. 7. – Is. 5. – P. 987-987.

УДК 535.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИИ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ РОГОВИЦЫ МИОПИЧЕСКОГО ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Павел Алексеевич Хорин*, Светлана Николаевна Хонина**

**Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет), г. Самара, Россия*

***Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара, Россия*

Аннотация

Предметом исследования являются данные измерений aberrаций, соответствующих функциям Цернике, полученные в глазной клинике по результатам aberрометрии при медицинских исследованиях роговицы. На основе медицинских данных с использованием численного моделирования восстановлен волновой фронт (ВФ) поверхностей роговицы и рассчитаны соответствующие функции рассеяния точки (ФРТ). Предложено компенсировать aberrации миопического глаза с учётом физической особенности поверхности роговицы, соответствующей осевым aberrациям. Показано, что для повышения качества зрения пациента необходимо учитывать внеосевые aberrации высоких порядков по типу кома третьего порядка и aberrации четвертого порядка

Ключевые слова

Аберрация, роговица, компенсация, функции Цернике, коррекция зрения, адаптивная оптика

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-37-90129)

SIMULATION OF WAVEFRONT ABERRATIONS COMPENSATION OF THE MYOPIC HUMAN EYE CORNEA

Pavel A. Khorin, Svetlana N. Khonina

**Samara National Research University, Samara, Russia*

***Image Processing Systems Institute of RAS, Samara, Russia*

Abstract

The subject of the study is measurement data of aberrations corresponding to Zernike functions obtained in the eye clinic from the results of aberrometry in medical examinations of the cornea. Based on medical data using numerical simulation, the wavefront of the corneal surfaces was reconstructed and the corresponding point spread functions (PSFs) were calculated. It is proposed to compensation for the aberrations of the myopic eye, taking into account the physical features of the surface of the cornea corresponding to axial aberrations. To improve the quality of the patient's vision, it is necessary to take into account high-order aberrations such as coma of the 3rd order and aberrations of the 4th order

Keywords

Aberration, cornea, compensation, Zernike functions, vision correction, adaptive optics

Acknowledgements

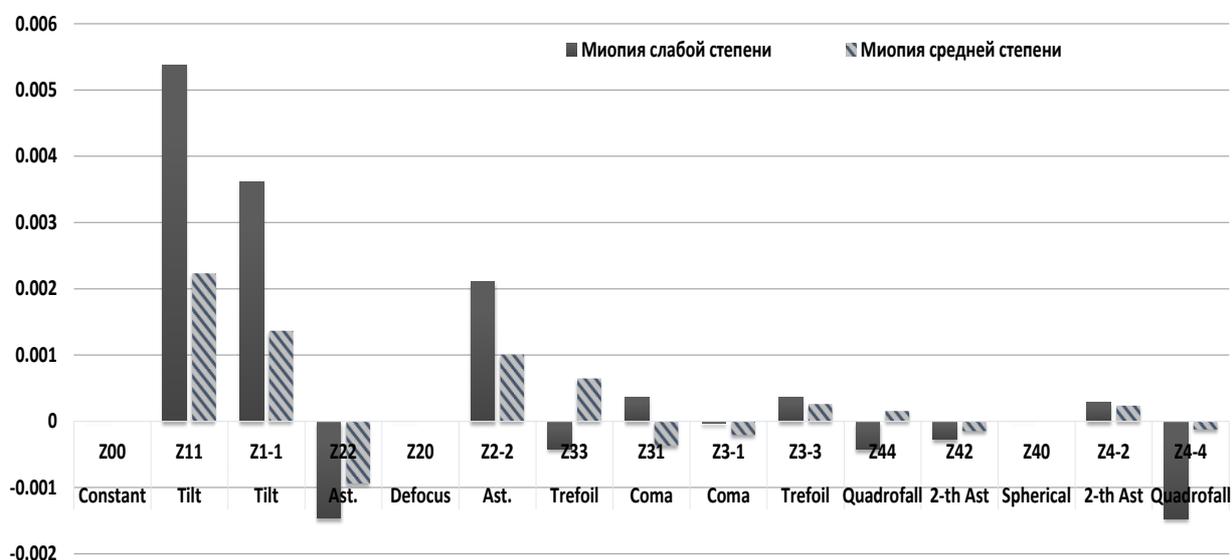
This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-37-90129)

Введение

Человеческий глаз может быть описан как система линз, состоящая из трех основных компонентов: роговицы, зрачка и хрусталика [1]. В данной работе особое внимание уделяется роговице, так как aberrации этой поверхности важны при формировании изображения и её коррекция осуществляется при оперативных вмешательствах [2, 3]. В данной работе выполнено моделирование по компенсации aberrаций роговицы глаза, полученных в глазной клинике по результатам aberрометрии при медицинских исследованиях.

Численное моделирование

Для эффективной компенсации волновых aberrаций роговицы миопического глаза человека, измеренных при aberрометрии в виде коэффициентов Цернике [4, 5], предлагается не учитывать осесимметричные aberrации с индексами $(n,0)$, связанные с кривизной поверхности роговицы [6], а обратить внимание на внеосевые типы aberrаций более высокого порядка. На рисунке представлено распределение коэффициентов Цернике, соответствующих внеосевым aberrациям, которые присутствуют на передней поверхности роговицы при диагнозах миопия слабой и средней степени. В таблице 1 показаны результаты моделирования компенсации aberrаций на роговице, обеспечивающее формирование волнового фронта (ВФ) и функции рассеяния точки (ФРТ) [7] с отклонением от эталона не более, чем на $p\%$.



Вид aberrации	Обозначение
Константа	Constant
Наклон	Tilt
Астигматизм	Ast.
Дефокусировка	Defocus
Трилистинк	Trefoil
Кома	Coma
Четырехлистник	Quadrofall
Астигматизм 2-го порядка	2-thAst.
Сферическая	Spherical

Рисунок. Распределение коэффициентов Цернике, соответствующих внеосевым aberrациям на передней поверхности роговицы при диагнозах миопия слабой и средней степени, полученные в глазной клинике по результатам aberрометрии

Таблица 1. ВФ и ФРТ для роговицы с патологией по типу миопии слабой степени до и после компенсации aberrаций с отклонением от эталона не более, чем на $p\%$

$p\%$	Поверхность роговицы						Сетчатка	
	Передняя		Задняя		Передняя и задняя			
	ВФ	ФРТ	ВФ	ФРТ	ВФ	ФРТ	ФРТ	СКО
1%								0,0003
10%								0,0028
30%								0,0081

Заключение

Результаты моделирования компенсации aberrаций на передней поверхности роговицы глаза показали эффективность учета внесосевых aberrаций, соответствующих индексам функций Цернике: $(1, \pm 1)$, $(2, \pm 2)$, $(3, 3)$ $(4, -4)$.

Литература

- [1] Lombardo M., Lombardo G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance //Journal of cataract & refractive surgery. – 2010. – V. 36. – Is. 2. – P. 313-331.
- [2] Roberts C. Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery //Journal of Refractive Surgery. – 2002. – V. 18. – Is. 5. – P. S589-S592.
- [3] O’Keefe M., O’Keefe N. Corneal surgical approach in the treatment of presbyopia //J Clin Exp Ophthalmol. – 2016. – V. 7. – Is. 512. – P. 2.
- [4] Khorin P.A., Volotovskiy S.G., Khonina S.N. Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions //Computer Optics. – 2021. – V. 45. – Is. 4. – P. 525-533.
- [5] Khorin P.A., Пыасова N.Yu., Paringer R.A. Informative feature selection based on the Zernike polynomial coefficients for various pathologies of the human eye cornea //Computer Optics. – 2018. – V. 42. – Is .1. – P. 159-166.
- [6] Guirao A., Redondo M., Artal P. Optical aberrations of the human cornea as a function of age //Journal of the Optical Society of America A. 2000. V. 17. P. 1697-1702.
- [7] Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th ed.). 1999. Cambridge: Cambridge Univ. Press. P. 986.

УДК 004.93

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ КОЖНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ

Сергей Андреевич Милантьев**,***, Анна Алексеевна Кордюкова**, Даниил Олегович Шевяков*,
Евгений Павлович Логачев**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

**Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

***Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе описана методика, позволяющая оценить значимость комбинаций цветовых компонент при извлечении признаков с помощью комбинации методов компьютерного зрения - *HOG* и *LBP* для решения основной задачи исследования - бинарной классификации кожных новообразований. В ходе работы использовались данные из датасета *ISIC*. Для оценки качества классификационных моделей *SVM*, *LightGBM* и полносвязной нейронной сети используются метрики *accuracy*, *precision*, *recall*, *f1-score*. Предложенный алгоритм является универсальным и применим как для анализа отдельных изображений кожных новообразований, так и их последовательностей, полученных посредством метода многоспектральной обработки изображений

Ключевые слова

Кожные новообразования, нейронные сети, *HOG*, *LBP*, обнаружение признаков, анализ изображений, многоспектральная обработка изображений

Благодарности

Работа была поддержана Минобрнауки РФ, госзадание № 075-00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011

APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES AND COMPUTER VISION FOR THE ANALYSIS OF IMAGES OF SKIN LESION

Sergey A. Milantev, Anna A. Kordyukova, Daniil O. Shevyakov, Evgeny P. Logachev

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

***ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

In this paper, there was considered the use of feature detection methods for skin lesions. There was tested the hypothesis about the significance of color components in various combinations. A diverse dataset dermoscopic images provided by *ISIC* was used for training. We applied combination of *HOG* and *LBP* methods for feature detection and *LightGBM*, *SVM*, *NN* to classify skin lesion. We used *precision*, *recall*, *f1-score* and *accuracy* metrics to evaluate this approach. The proposed approach is universal and applicable both for the analysis of various skin lesion images and for their sequences obtained by the method of multispectral image processing

Keywords

Skin lesion, *neural networks*, *HOG*, *LBP*, *feature detection*, *image analysis*, *multispectral image processing*

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, state task No. 075-00761-22-00, topic No. FZZM-2022-0011

Введение

Ранняя диагностика злокачественных новообразований кожи сегодня является весьма актуальной проблемой. Активное развитие фотоники способствовало появлению новых оптических методов исследования кожных новообразований, позволяющих расширить диагностические возможности дермоскопии. Одним из них является авторский метод

многоспектральной обработки изображений кожных новообразований [1].

Для детального изучения любых изображений кожных новообразований большой интерес представляет применение нейронных сетей и методов компьютерного зрения. С их помощью можно перейти к решению одной из основных задач диагностики кожных новообразований – классификации их на доброкачественные и злокачественные. При этом необходимо определить маркеры, имеющую различную природу: цвет, размер, контур, интенсивность отражения света от исследуемого участка кожи. В данной работе разрабатывается методика, позволяющая оценить значимость комбинаций цветовых компонент, содержащихся в исследуемых изображениях.

Используемые методы и подходы

Для решения поставленной задачи необходимо выявить наиболее значимые цветовые каналы, содержащие исследуемые изображения. При этом следует провести анализ комбинаций цветовых компонент, а именно - градации серого, *RGB*, *YCbCr*. Для этого используется случайно сгенерированная и сбалансированная выборка из общедоступного датасета *ISIC-2019* и *ISIC-2020* [2]. Для повышения качества изображений, а именно удаления черных областей, ко всей выборке применяются преобразования, содержащиеся в пакете *ImageMagick*. На следующем этапе используется Гауссовское размытие с ядром 3×3 для улучшения структуры изображений в различных масштабах, а также выполняются цветовые преобразования *RGB*, *YCbCr*, *Grayscale*.

После проведения всех операций по подготовке исследуемых данных по каждому образцу из выборки формируются коллекции цветовых компонент. Для анализа полученной коллекции применяются методы компьютерного зрения, основной задачей которых является обнаружение соответствующих данных из обрабатываемых изображений. Большой интерес при решении поставленной задачи исследования представляет применение методов *HOG* и *LBP* [3].

Для оценки качества результатов классификационных моделей используются метрики *accuracy* по кросс-валидации и *accuracy*, *precision*, *recall* и *f1-score* на тестовой выборке. Эти метрики позволяют оценить качество и стабильность предлагаемой модели.

Заключение

В работе описана методика, позволяющая провести оценку значимости комбинаций цветовых компонент на основании конкатенации извлеченных признаков с помощью методов *HOG* и *LBP*. Применение данного подхода позволит улучшить метрики традиционных моделей, в том числе, ожидаются улучшения при параллельном добавлении признаков в архитектуру ансамбля сверточных нейронных сетей. Предложенный алгоритм является универсальным и применим как для анализа отдельных изображений кожных новообразований, так и их последовательностей, полученных посредством авторского метода многоспектральной обработки изображений.

Литература

- [1] Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Application of acousto-optic tunable filters in the devices of skin cancer diagnostics //Biophotonics – Riga 2020. – SPIE, 2020. – V. 11585. – P. 124-127.
- [2] Rotemberg V. et al. A patient-centric dataset of images and metadata for identifying melanomas using clinical context //Scientific data. – 2021. – V. 8. – Is. 1. – P. 1-8.
- [3] Alhakeem Z., Jang S. I. An LBP-HOG Descriptor Based on Matrix Projection for Mammogram Classification //arXiv preprint arXiv:1904.00187. – 2019.

КОГЕРЕНТНАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

УДК 535.317.1

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ
ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ПОЛЯ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ**

Максим Валерьевич Савельев, Франциско Алфонсо Хернандез Гонзалез

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия*

Аннотация

Предмет исследования. Проведен теоретический анализ пространственной селективности четырехволнового преобразователя излучения в поглощающей жидкости, содержащей наночастицы, при распространении волн накачки коллинеарно силе тяжести. **Метод.** Выражение, описывающее пространственный спектр объектной волны, получено в приближении заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента преобразования с использованием метода фурье-образа функции размытия точки. **Основные результаты.** Установлено, что поглощение среды и сила тяжести наночастиц оказывают различное влияние на эффективность преобразования пространственных частот сигнальной волны. Показано, что при малой величине силы тяжести в модуле амплитуды объектной волны вблизи нулевой пространственной частоты присутствует провал. Проведены расчеты зависимостей полуширины провала от силы тяжести, в которых наблюдается минимум. С увеличением коэффициента поглощения положение минимума смещается в область больших значений силы тяжести. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть полезны при проектировании систем нелинейной адаптивной оптики на основе коллоидных растворов и суспензий в задачах коррекции мелкомасштабных фазовых искажений

Ключевые слова

Четырехволновой преобразователь излучения, поглощающая двухкомпонентная среда, поле тяжести Земли

**SPATIAL SELECTIVITY OF THE FOUR-WAVE RADIATION CONVERTER IN AN
ABSORBING TWO-COMPONENT MEDIUM WITH ALLOWANCE FOR THE
EARTH'S GRAVITY FIELD**

Maxim V. Savelyev, Francisco A. Hernandez Gonzalez

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

A theoretical analysis of the spatial selectivity of the four-wave radiation converter in an absorbing liquid containing nanoparticles when pump waves propagate collinearly to gravity. The expression describing the spatial spectrum of the object wave was obtained in the approximation of a given field from pump waves and a small transformation coefficient using the method of the Fourier-transform of point spread function. Found that the medium absorption and the gravity force of nanoparticles have different effects on the conversion efficiency of the spatial frequencies of the signal wave. Shown, that at a small gravity force there is a dip in the amplitude modulus of the object wave near the zero spatial frequency. The dependences of the half-width of the dip on the gravity force are calculated, in which a minimum is observed. With an increase in the absorption coefficient the minimum position shifts to the region of high values of the gravity force. Received results can be useful in designing systems of nonlinear adaptive optics based on colloidal solutions and suspensions in problems of correcting small-scale phase distortions

Keywords

Four-wave radiation converter, absorbing two-component medium, Earth's gravity field

Введение

Четырехволновые преобразователи излучения (ЧПИ), осуществляющие обращение волнового фронта [1], могут быть реализованы в различных средах, в частности, двухкомпонентных, в которых нелинейность показателя преломления вызвана записью температурной и концентрационной решеток [2].

В работах [3, 4] показано, что при распространении встречных волн накачки ортогонально и коллинеарно силе тяжести F , действующей на наночастицы в прозрачной жидкости, ЧПИ вырезает из амплитуды сигнальной волны низкие пространственные частоты. Однако на длине волны излучения всегда присутствует поглощение среды, что может существенно сказаться на эффективности ЧПИ [5]. Цель работы – анализ пространственной структуры объектной волны в зависимости от величины F , коллинеарной волнам накачки, и коэффициента поглощения среды α .

Результаты анализа пространственной селективности

В приближении заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента преобразования с использованием условий отсутствия полного потока наночастиц через грани плоского слоя жидкости [6] и неизменности на них температуры [3, 4] получено аналитическое выражение для амплитуды пространственного спектра объектной волны на верхней грани. Волны накачки считались плоскими, а сигнальная волна моделировалась волной от точечного источника, расположенного на верхней грани.

Анализ показал, что при фиксированной толщине среды коэффициент поглощения α оказывает влияние на эффективность преобразования ЧПИ всех пространственных частот сигнальной волны, в то время как сила тяжести наночастиц F – только на эффективность преобразования низких частот. При малой величине F пространственная селективность ЧПИ характеризуется полушириной провала $\Delta\chi$ [3]. В зависимости $\Delta\chi$ от F присутствует минимум, который с ростом α смещается в область больших F .

Заключение

Результаты анализа пространственной селективности ЧПИ свидетельствуют о фильтрации им высоких пространственных частот, что может быть предпочтительным в системах компенсации мелкомасштабных фазовых искажений.

Литература

- [1] Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010. 246 с.
- [2] Ivanov V.I., Ivanova G.D. Dufour effect in the nanosuspension in a light field //24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2018. – V. 10833. – P. 378-382.
- [3] Ремзов А.Д., Савельев М.В. Встречное четырехволновое взаимодействие в прозрачной суспензии наночастиц в поле тяжести Земли // Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т. 85. – № 12. – С. 1770-1775.
- [4] Савельев М.В., Ивахник В.В. Пространственная селективность четырёхволнового преобразователя излучения с учётом силы тяжести, действующей на растворённые в прозрачной жидкости наночастицы // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, – № 8. – С. 694-703.
- [5] Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственная селективность четырехволнового преобразователя излучения в поглощающей двухкомпонентной среде при больших коэффициентах отражения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 5-13.
- [6] Larsson C., Kumar S., Nonuniformities in miscible two-layer two-component thin liquidfilms // Physical Review Fluids. – 2021. – V. 6. – P. 034004.

УДК 535–14, 535.583, 535.341.08

СПЕКТРОСКОПИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ СЕМЕЙСТВА БОРАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Дмитрий Михайлович Лубенко*, Дмитрий Михайлович Ежов**, Валерий Анатольевич Светличный**, Юрий Михайлович Андреев***, Назар Александрович Николаев****

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

***Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

****Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Аннотация

Кристаллы семейства боратов эффективны для решения задач нелинейной оптики в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах. Известно также об их относительной прозрачности в субтерагерцовом диапазоне частот, что позиционирует их как потенциально эффективные оптико-терагерцовые преобразователи под интенсивной накачкой. В данной работе приведены результаты исследования дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения кристаллов LBO, β -BBO, LB4 и BIBO методами импульсной терагерцовой спектроскопии. Определены условия фазового согласования для нелинейного преобразования частот интенсивных лазерных источников в ТГц диапазон. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о перспективности применения вышеупомянутых кристаллов в качестве надежных интенсивных ТГц источников

Ключевые слова

Нелинейные кристаллы, бораты, терагерцовая спектроскопия, показатель преломления, коэффициент поглощения, фазовый синхронизм, генерация терагерцовых частот

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проектов государственного задания ИАиЭ СО РАН (№ 121032400052–6), ИМКЭС СО РАН (№ 121031300155–8) и гранта РФФИ «Аспиранты» №20–32–90106. Авторы благодарят ЦКП «Спектроскопия и Оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленное оборудование

SPECTROSCOPY OF NONLINEAR CRYSTALS OF THE BORATE FAMILY AND THEIR APPLICATION AS SOURCES OF INTENSE TERAHERTZ RADIATION

Dmitry M. Lubenko, Dmitry M. Ezhov, Valery A. Svetlichny, Yury M. Andreev, Nazar A. Nikolaev

*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

**National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

***Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

****Institute of Automation & Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract

Nonlinear crystals of borate family are efficient converters of laser radiation in the UV, visible, and near-IR ranges. They are relatively transparent in the subterahertz frequency range, which positions them as potentially efficient optical-to-THz converters under intense pumping. In this paper, we present the dispersion of the refractive index and absorption coefficient of LBO, β -BBO, LB4, and BIBO crystals studied by terahertz time-domain spectroscopy. The phase matching conditions for the nonlinear frequency conversion of intense laser sources into the THz range are estimated. The results allow us to conclude that the crystals can serve as reliable intense THz sources

Keywords

Nonlinear crystals, borates, terahertz spectroscopy, refractive index, absorption coefficient, phase matching, terahertz frequency generation

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the State Assignment projects of IA&E SB RAS (No. 121032400052–6), IMCES SB RAS (No. 121031300155–8), and the project No. 20–32–90106 of the Russian

Foundation for Basic Research. The authors express their gratitude to the Shared Equipment Center "Spectroscopy and Optics" of the IA&E SB RAS for the provided instrumental support

Введение

Кристаллы семейства боратов можно назвать классическими для решения задач нелинейной оптики в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах [1]. Их преимуществом перед кристаллами других семейств является возможность изготовления широкоапертурных элементов, обладающих высоким порогом оптического пробоя. В настоящее время стало известно об относительной прозрачности боратных кристаллов в субтерагерцовом диапазоне частот, что в конечном счете позиционирует их как потенциально эффективные оптико-терагерцовые преобразователи под интенсивной накачкой в предпороговом режиме.

Методы исследования и образцы

В работе исследованы образцы кристаллов β - BaB_2O_4 (β -BBO), LiB_3O_5 (LBO), $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (LB4) и BiB_3O_6 (BIBO). Кристаллы LBO, β -BBO и LB4 выращены в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Кристаллы BIBO приобретены у компании Cstech Inc., Китай. Образцы представляли из себя плоскопараллельные пластины нескольких толщин с апертурой $\sim 1 \text{ см}^2$, полированные до высокого оптического качества. Дисперсия показателя преломления и коэффициент поглощения образцов исследованы с помощью поляризационного импульсного терагерцового спектрометра, подробное описание которого можно найти в другой работе [2]. Дисперсия показателей преломления кристаллов аппроксимирована в форме уравнений Зельмеера, которые использовались для расчёта фазового согласования (ФС) для процесса генерации разностных частот (ГРЧ) при накачке интенсивными лазерными источниками с длинами волн 0.8–1 мкм.

Ключевые результаты исследования

Коэффициенты поглощения главных оптических осей кристаллов с наибольшими потерями представлены на рисунке. Исходя из этих данных, наименьшие потери при оптико-терагерцовом преобразовании следует ожидать в кристаллах β -BBO и BIBO. Расчёты показывают наличие ФС для генерации частот в диапазоне 0.1–1 ТГц во всех четырех кристаллах (таблица).

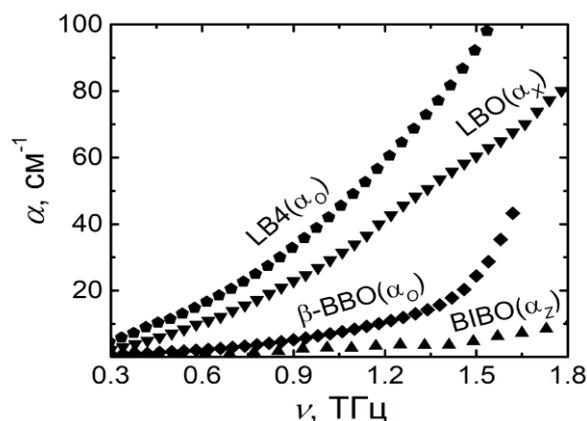


Рисунок. ТГц Коэффициент поглощения боратных кристаллов

Таблица. Срезы кристаллов, пригодные для генерации суб-ТГц волн в условиях ФС

Кристалл	θ°	φ°
β -BBO	3–10	0
LBO	48–57	0
LB4	8–20	0
BBO	24–27	0

Из представленных данных видно, что наименьшими углами синхронизма θ обладают одноосные кристаллы β -BBO и LB4. Меньшие углы θ дают меньший угол сноса, и как следствие позволяют использовать толстые образцы для достижения большей эффективности преобразования. Таким образом, исходя из критерия наименьшего поглощения и наименьшего угла синхронизма, кристалл β -BBO является с нашей точки зрения наиболее перспективным. Более того, он на втором месте после BBO по величине нелинейных коэффициентов.

Предварительные эксперименты по преобразованию импульсов титан-сапфирового лазера (950 нм, 60 фс, 10 Гц, 20 мДж) в ТГц диапазон в кристалле β -BBO, позволившие получить десятки киловатт интенсивности, подтверждают обоснованность предложенного во введении подхода. Практическая значимость представленной работы лежит в плоскости применения интенсивных ТГц источников, в которой можно выделить несколько важных направлений: разработка малогабаритных ускорителей заряженных частиц; разработка ТГц ЛИДАРных систем мониторинга малых газовых компонент приземного слоя атмосферы; а также развитие нелинейной оптики в дальнем ИК и миллиметровом диапазонах длин волн.

Литература

- [1] Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: a complete survey. Springer Science. 2005.
- [2] Wang C.R. et al. Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K //Infrared Physics & Technology. – 2019. – V. 97. – P. 1-5.

УДК 616.12-073

**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СФЕРОИДАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР НА
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВОПРОСАХ УСИЛЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА**

**Карина Игоревна Матвеева, Андрей Юрьевич Зюбин, Игорь Игоревич Кон,
Илья Геннадьевич Самусев**

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация

В представленной работе отражены и проанализированы результаты по применению метода конечных разностей во временной области (FDTD - Finite-Difference Time-Domain) для численного моделирования зависимости электрического усиления напряженности поля от размера золотых сфероидальных наночастиц (золотые наностержни) и их ориентации относительно падающей плоской волны. Было продемонстрировано, что напряжённость электрического поля имеет нелинейную зависимость от размера для случая параллельной поляризации относительно длинной оси наностержня

Ключевые слова

FDTD-моделирование, плазмонный резонанс, сфероидальные наночастицы, наностержни

Благодарности

Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-02-2021–1748

**INFLUENCE OF ORIENTATION OF SPHEROIDAL NANOSTRUCTURES ON
ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN THE ISSUES OF INTENSITY
AMPLIFICATION OF RAMAN SCATTERING**

Karina I. Matveeva, Andrey Y. Zyubin, Igor I. Kon, Ilya G. Samusev
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract

The presented work reflects and analyzes the results of applying the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method for numerical simulation of the dependence of the electric field strength gain on the size of gold spheroidal nanoparticles (gold nanorods) and their orientation relative to the incident plane wave. It was demonstrated that the electric field strength has a non-linear dependence on the size for the case of parallel polarization with respect to the long axis of the nanorod

Keywords

FDTD simulation, plasmon resonance, spheroidal nanoparticles, nanorods

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-02-2021-1748

Введение

Исследования низкомолекулярных соединений является одной из быстро развивающихся направлений в спектроскопическом анализе. Регистрация усиленного сигнала комбинационного рассеяния света позволяет производить высокоточный структурный анализ данных объектов [1, 2]. Применение метода гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС) возможно благодаря возбуждению плазмонного резонанса в наноструктурах. Подбор оптимальных условий возбуждения, параметров наночастиц (НЧ) позволяет достичь высоких значений усиления ГКРС (до 10^{15}).

FDTD является эффективным методом исследования взаимодействия электромагнитной волны и плазмонных нанообъектов. При различных конфигурациях НЧ и падающего излучения можно рассчитать максимальный коэффициент усиления ГКРС, а

также спрогнозировать геометрическое распределение и напряжённость внешнего поля наночастиц.

В рамках данной работы была проанализирована зависимость электрического усиления напряженности поля от размера золотых наностержней (AuNRs) и от угла их поворота относительно падающей плоской волны.

Используемые методы и подходы

В качестве используемого базового алгоритма был использована методика, описанная в работе [3], с внесенными корректировками. В качестве источника возбуждения использовалась плоско-поляризованная волна ($\lambda=632$ нм), вектор напряженности электрического поля распространялся вдоль оси x . Источник располагался на расстоянии 5 нм от AuNRs. Сетка моделирования имела шаг $dx, dy, dz = 1$ нм. Время симуляции составило $T = 1000$ фс. Длина R_h золотых наностержней варьировалась от 20 нм до 120 нм, при постоянном радиусе $a=8$ нм (короткая ось).

Результаты и заключение

Установлено, что минимальные значения напряжённости внешнего электрического поля наблюдались для случая падения волны на торец наностержня ($x=0, y=0, z=0$) (см. рисунок). Зависимость напряжённости электрического поля E от длины наностержня R_h имеет линейный характер. Аналогичная линейная зависимость также наблюдается при повороте AuNRs по оси $x = 90^\circ$. Нелинейная зависимость напряжённости внешнего электрического поля (E) была получена при повороте золотого наностержня относительно оси $y = 90^\circ$.

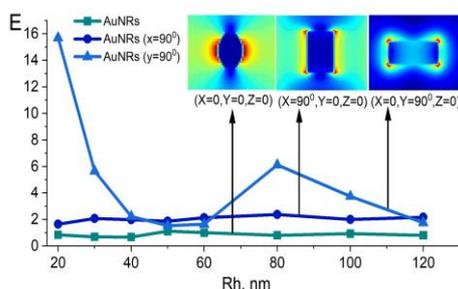


Рисунок. Графики зависимости напряжённости внешнего электрического поля (E) от размеров золотых наностержней

Для последнего случая ($x = 0, y = 90^\circ, z = 0$) возбуждалась мода продольного резонанса (L-мода), которая локализована на головках стержня. В случае поперечной моды локализация происходит по бокам наностержня.

Литература

- [1] Boginskaya I., et al. Detection of Organic Substances by a SERS Method Using a Special Ag-Poly (Chloro-P-Xylylene)-Ag Sandwich Substrate //Coatings. – 2020. – V. 10. – Is. 8. – P. 799.
- [2] Aitekenov S., et al. Raman, Infrared and Brillouin spectroscopies of biofluids for medical diagnostics and for detection of biomarkers //Critical Reviews in Analytical Chemistry. – 2022. – P. 1-30.
- [3] Kon I.I., et al. FDTD simulations field on gold nanoparticles and silver nanorods //Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. – 2021. – V. 11904. – P. 119041I.

УДК 621.373.826

ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПАРАБОЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ НА РЕЗОНАНСНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Валерий Владимирович Ивахник, Елена Владимировна Воробьева, Дархан Рахметулович Капизов

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет), г. Самара, Россия*

Аннотация

Исследованы пространственные и временные характеристики вырожденного четырехволнового преобразователя в волноводе с резонансной нелинейностью в схеме со встречными волнами накачки. Получено и проанализировано выражение для функции временного отклика, устанавливающей интегральную связь между временными зависимостями коэффициентов в разложении амплитуд сигнальной и объектной волн по модам волновода. Получено и проанализировано выражение для функции размытия точки четырехволнового преобразователя излучения.

Ключевые слова

Четырехволновое взаимодействие, параболический волновод, резонансная нелинейность, функция размытия точки, временной отклик

FOUR-WAVE MIXING IN PARABOLIC WAVEGUIDE WITH RESONANT NONLINEARITY

Valeriy V. Ivakhnik, Elena V. Vorobeva, Darkhan R. Kapizov
Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

The spatial and temporal characteristics of a degenerate four-wave converter in a multimode waveguide with resonant nonlinearity in a scheme with counter-pumping waves have been investigated. An expression for the time response function has been obtained and analyzed, which establishes an integral relationship between the time dependencies of the coefficients in the expansion of the signal and object waves amplitudes by the waveguide modes. An expression for the point spread function (PSF) of a four-wave radiation converter has been obtained and analyzed.

Keywords

Four-wave mixing, parabolic waveguide, resonant nonlinearity, point spread function, time response

Волноводы, заполненные средой с резонансной нелинейностью, являются многообещающими устройствами нелинейной оптики. В них за счет подбора частот взаимодействующих волн можно добиться высоких значений нелинейной восприимчивости. Кроме того, в таких устройствах с высокой степенью эффективности можно наблюдать различные нелинейные явления при использовании сравнительно маломощных источников излучения. Четырехволновые взаимодействия в многомодовых волноводах используются для решения задач адаптивной оптики, пространственной и временной обработки сигналов, квантовой криптографии, интерферометрии и т. д. [1]. Актуальным является вопрос о соответствии пространственно-временных структур отраженной (объектной) и падающей волн [2]. В настоящей работе анализируются пространственные и временные характеристики вырожденного четырехволнового преобразователя излучения в параболическом волноводе с резонансной нелинейностью в схеме со встречными волнами накачки.

Предполагается, что нелинейная среда моделируется трехуровневой схемой энергетических уровней, один из которых является метастабильным. Четырехволновое взаимодействие описывается стационарным волновым уравнением, которое дополняется

кинетическими уравнениями для заселенностей энергетических уровней. При этом используются приближения заданного поля по первой волне накачки и малого коэффициента преобразования. Взаимодействующие волны, коэффициент поглощения и заселенности энергетических уровней раскладываются по модам световода.

С использованием функции временного отклика для четырехволнового преобразователя излучения в многомодовом волноводе с резонансной нелинейностью проанализирована связь между временными зависимостями коэффициентов в разложении амплитуд объектной и сигнальной волн по модам волновода. Временная зависимость амплитуды объектной волны на передней грани волновода определяется не только временными зависимостями амплитуд сигнальной волны, волн накачки на гранях волновода, но и их пространственной структурой.

В случае одномодовых волн накачки с равными номерами мод временная зависимость коэффициентов в разложении по модам волновода амплитуды объектной волны полностью определяется временной зависимостью коэффициентов в разложении по модам волновода амплитуды сигнальной волны. Для волновода с параболическим профилем показателя преломления при одномодовых волнах накачки с равными номерами мод наибольший вклад в поле объектной волны дает мода волновода, номер которой совпадает с номером моды волн накачки.

Получено выражение для функции размытия точки (ФРТ) четырехволнового преобразователя излучения в двумерном параболическом световоде. С увеличением поперечной координаты модуль ФРТ монотонно уменьшается. Основная доля энергии в преобразованном изображении точечного сигнала сосредоточена в центральном максимуме ФРТ. В качестве характеристики точности обращения волнового фронта используется полуширина центрального максимума модуля ФРТ.

Для стационарного режима при одномодовых волнах накачки с равными номерами мод с увеличением номера моды волн накачки наблюдается перераспределение энергии, сосредоточенной в «хвостах» функции размытия точки, уменьшение полуширины ее модуля.

С увеличением интенсивности первой волны накачки полуширина модуля ФРТ монотонно уменьшается. При этом максимальное значение модуля ФРТ вначале увеличивается, достигает наибольшего значения, а затем уменьшается. Характер зависимости полуширины модуля ФРТ четырехволнового преобразователя излучения в параболическом волноводе от номера моды волн накачки, интенсивности первой волны накачки схож с аналогичными зависимостями для четырехволнового преобразователя излучения в волноводе с резонансной нелинейностью с зеркальными стенками [3]. Учет пространственной структуры гауссовой волны накачки приводит с уменьшением ширины пучка накачки к монотонному уменьшению с последующим выходом на постоянное значение полуширины модуля ФРТ.

Литература

- [1] Anjum O.F. et al. Polarization-insensitive four-wave-mixing-based wavelength conversion in few-mode optical fibers //Journal of Lightwave Technology. – 2018. – V. 36. – Is. 17. – P. 3678-3683.
- [2] Zhang H. et al. Multiple modal and wavelength conversion process of a 10-Gbit/s signal in a 6-LP-mode fiber //Optics express. – 2019. – V. 27. – Is. 11. – P. 15413-15425.
- [3] Воробьева Е.В., Ивахник В.В., Кауров А.В. Пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения в многомодовом световоде с резонансной нелинейностью //Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21. – №. 1. – С. 4–11.

УДК 621.373.826

**КАЧЕСТВО УДВОЕННОГО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА
ШЕСТИВОЛНОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУМЕРНОМ
МНОГОМОДОВОМ ВОЛНОВОДЕ С ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

Валерий Владимирович Ивахник, Дархан Рахметулович Капизов, Владимир Иванович Никонов

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет), г. Самара, Россия*

Аннотация

Для шестиволнового преобразователя излучения в двумерном волноводе с тепловой нелинейностью при малом коэффициенте отражения проанализировано влияние пространственной структуры (Гауссовой) второй волн накачки на качество обращения волнового фронта. Показано, что полуширина модуля функции размывания точки для шестиволнового преобразователя излучения по мере уменьшения радиуса Гауссовой второй волны накачки и первой одномодовой волны накачки существенно уменьшается, наблюдается улучшение качества обращения волнового фронта

Ключевые слова

Шестиволновой преобразователь излучения, тепловая нелинейность, обращение волнового фронта

**THE QUALITY OF DOUBLE WAVEFRONT CONJUGATION BY A SIX-WAVE
RADIATION CONVERTER IN A TWO- DIMENSIONAL MULTIMODE WAVEGUIDE
WITH THERMAL NONLINEARITY**

Valeriy V. Ivakhnik, Darkhan R. Kapizov, Vladimir I. Nikonov

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

For a six-wave radiation converter in a two-dimensional waveguide with thermal nonlinearity at a low reflection coefficient, the influence of the spatial structure (Gaussian) of the second pump waves on the quality of wavefront conjugation is analyzed. It is shown that the half-width of the modulus of the point smearing function for a six-wave radiation converter decreases significantly as the radius of the second Gaussian pump wave and the first single-mode pump wave decrease, and an improvement in the quality of wavefront conjugation is observed

Keywords

Six-wave radiation converter, thermal nonlinearity, wavefront conjugation

В системах нелинейной адаптивной оптики для обработки в реальном масштабе времени оптических сигналов могут применяться как четырех-, так и шестиволновые преобразователи излучения. Использование шестиволновых взаимодействий существенно расширяет возможности управления параметрами световых волн, в частности, при шестиволновом взаимодействии можно получить волну с удвоенным обращенным волновым фронтом [1–3]. Переход от рассмотрения шестиволновых взаимодействий в неограниченных по поперечным размерам нелинейным средам к шестиволновым взаимодействиям в волноводах позволяет за счет увеличения области взаимодействия при неизменной интенсивности волн накачки существенно повысить эффективность таких преобразователей.

В настоящей работе при малом коэффициенте отражения исследовано влияние на качество обращения волнового фронта (ОВФ) шестиволновым преобразователем излучения в двумерном волноводе с тепловой нелинейностью пространственной (гауссовой) структуры волн накачки.

Рассмотрено шестиволновое взаимодействие со встречной схемой вида $\omega_1 + \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 - \omega_1 = \omega_2$, в результате возникает объектная волна с удвоенным обращенным волновым фронтом по отношению к волновому фронту сигнальной волны.

В случае малых коэффициентах отражения без учета самодифракции волн накачки при отводе тепла от граней волновода на рисунке приведены характерные зависимости полуширины объектной волны $n = 0$ от радиуса гауссовой второй волны накачки при условии, что первая волна накачки одномодовая с номером моды для шестиволнового преобразователя (рисунок, кривая 1) и четырехволнового преобразователя (рисунок, кривая 2 для сравнения) в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями, находящимися на расстоянии $2a$ друг от друга. В качестве сигнальной волны использовалась волна от точечного источника, расположенного на передней грани волновода.

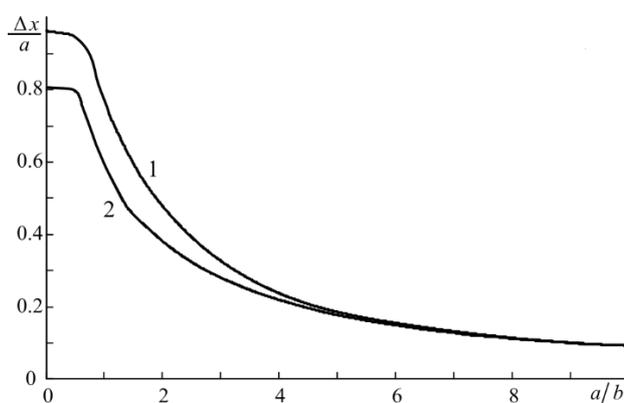


Рисунок. характерные зависимости полуширины объектной волны $n = 0$ от радиуса гауссовой второй волны накачки

Для шестиволнового преобразователя в волноводе с бесконечно проводящими поверхностями при $\pi L/2a = 140$, $k_1 n_1 L = 3200$, $k_2 n_2 L = 6400$, $aL = 0,34$ уменьшение радиуса второй волны накачки от $b=2a$ до $b=0,2a$ приводит к уменьшению полуширины объектной волны в 5,6 раз. Качество удвоенного ОВФ улучшается. Сходные зависимости качества ОВФ в зависимости от радиуса гауссовой волны накачки наблюдается и для четырехволнового преобразователя излучения в волноводе с тепловой нелинейностью. Для того же диапазона изменений радиуса гауссовой волны накачки полуширина объектной волны уменьшалась в 4,5 раза.

Литература

- [1] Zhang Z. et al. Coexisting four-wave mixing and six-wave mixing in three-level atomic system // Optics Communications. – 2012. – V. 285. – Is. 17. – P. 3627-3630.
- [2] Zhang Y. et al. Phase control of six-wave mixing from circularly polarized light // Optical Materials. – 2016. – V. 58. – P. 310-316.
- [3] Ормачева О., Толстик А.Л. Формирование нелинейных динамических голограмм в чистых органических жидкостях // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2007. – Т. 71. – № 1. – С. 131–135.

**ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ И
СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ**

УДК 535.4:539.3

СПЕКЛ-ФОТОНИКА НЕКОТОРЫХ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИВОЙ И НЕЖИВОЙ МАТЕРИИ

Александр Петрович Владимиров

Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

На основе моделей, связывающих фазы зондирующих волн с физическими параметрами, характеризующими необратимые процессы, аналитически решены задачи о динамике спеклов в плоскости изображения отражающего и тонкого прозрачного объектов. С использованием полученных формул изучены особенности зарождения трещины при многоциклового усталости ряда материалов, развития турбулентного течения воздуха, функционирования живых клеток. Впервые создан когерентно-оптический метод, позволяющий определять деформации на минимальной базе порядка 1 мкм. С использованием метода впервые показано, что при многоциклового усталости предельная локальная растягивающая деформация металла имеет порядок 10^{-1} . Для группы культивированных клеток и для разных частей отдельной клетки найдены дисперсии и времена корреляции разности оптических путей пар волн, соответствующие процессам, регулирующим осмотическое давление и обмен веществ. На основе полученных данных рассмотрены перспективы создания датчиков, методов и приборов неразрушающего контроля нового поколения для техники и медицины

Ключевые слова

Спеклы, многоциклового усталость, живые клетки, турбулентный поток, необратимый процесс

Благодарности

Автор благодарит Каманцева И.С., Друкаренко Н.А., Мызнова К.Е., Рогову Е.А., Бахарева А.А. и Михайленко Ю.А. за помощь в проведении экспериментов

SPECKLE-PHOTONICS OF SOME IRREVERSIBLE PROCESSES OF LIVING AND LIFELESS MATTER

Alexander P. Vladimirov

Institute of Engineering Science UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Based on models linking the phases of probing waves with physical parameters characterizing irreversible processes, the problems of speckle dynamics in the image plane of reflective and thin transparent objects are analytically solved. Using formulas, the features of crack nucleation under high-cycle fatigue of a number of materials, the development of turbulent air flow, and the functioning of living cells have been studied. For the first time, a coherent optical method has been developed that allows determining deformations on a minimum base of about 1 micron. Using the method, it was shown for the first time that with high -cycle fatigue, the limiting local tensile deformation of the metal has an order of 10^{-1} . For a group of cultured cells and for different parts of an individual cell, the variances and correlation times of differences in optical paths of wave pairs corresponding to the processes regulating osmotic pressure and transport of substances were found. Based on the data obtained, the prospects of creating sensors, methods and devices of non-destructive testing of a new generation for technology and medicine are considered

Keywords

Speckle, high-cycle fatigue, living cell, turbulent flow, irreversible processes

Acknowledgements

The author thanks I. S. Kamantsev, N. A. Drukarenko, K. E. Myznov, E. A. Rogova, A.A. Bakharev and Yu.A. Mikhailova for their help in conducting experiments

Введение

Настоящая публикация направлена на установление связи между параметрами, характеризующими необратимые процессы, протекающие в некоторых технических и живых объектах, с параметрами динамики спеклов. Рассматриваются процессы,

возникающие при многоцикловой усталости материалов, внутри культивируемых клеток, при формировании турбулентного течения воздуха.

Целью исследования являлось:

- 1) создание физических моделей, связывающих физические параметры необратимых процессов с фазами зондирующих объекты волн;
- 2) на основе моделей аналитическое решение задачи о динамике спеклов в плоскости изображения отражающего и прозрачного объектов;
- 3) использование полученных формул для изучения особенностей зарождения трещины при многоцикловой усталости ряда материалов, функционирования живых клеток в норме и при воздействии токсичных веществ, изучение формирования турбулентного течения газа.

Теория

На основе модели тонкого деформируемого прозрачного объекта, освещенного через случайно – фазовый экран, а также на модели отражающего шероховатого деформируемого объекта, освещенного лазерным излучением, решены задачи о динамике спеклов в плоскости изображения объектов [1–4]. В предположении, что разность оптических путей $\otimes u$ двух волн равна сумме M случайных независимых величин $\otimes u_m$, получены формулы, связывающие параметры, характеризующие флуктуации $\otimes u_m$ и флуктуации интенсивности рассеянного излучения I в плоскости наблюдения.

Теоретически обоснована методика выделения из зависимости $I(t)$ сигналов $I_m(t)$, соответствующих процессам $\Delta u_m(t)$, а также процедура определения дисперсии σ_m^2 и времени корреляции τ_m величин $\otimes u_m$ [5].

Эксперименты

Впервые в мире обоснована и создана оптическая методика определения деформаций на минимальной базе порядка 1 мкм. На основе связи между $\otimes u$ и вектором относительного перемещения $\Delta \vec{u}$ двух точек поверхности в опыте на многоцикловую усталость построены зависимости трех компонент вектора $\Delta \vec{u}$ от числа циклов. Впервые показано, что при многоцикловой усталости предельная локальная растягивающая деформация стали перед разрушением имеет порядок 10^{-1} [4].

Приведены зависимости $\sigma_m(\tau_m)$, зарегистрированные:

- 1) на стадии зарождения усталостной трещины в стали 09Г2С;
- 2) для группы культивируемых клеток и для разных частей отдельной клетки в норме и при ингибировании конкретных внутриклеточных процессов;
- 3) на стадии формирования и стационарного течения турбулентного потока.

На основе найденных зависимостей изучены особенности накопления усталостных повреждений, определены времена релаксации величин Δu_m , соответствующих разным физико-химическим процессам в живой клетке, в турбулентном потоке для возмущения с максимальным временем корреляции найдена хорошая корреляция профилей σ_m и температуры.

Заключение

Полученные данные являются базой для создания оптических и неоптических датчиков и приборов для медицины и неразрушающего контроля нового поколения, методов диагностики и расчета остаточной долговечности деталей, создания физических моделей функционирования живых клеток в норме и при внешних воздействиях.

Литература

- [1] Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro-and microprocesses in deformable media //Optical Engineering. – 2016. – V. 55. – Is. 12. – P. 121727.
- [2] Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами //Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127. – №. 5. – С. 870.
- [3] Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия микроскопических процессов, протекающих в тонких биологических объектах //Известия вузов. Радиофизика. – 2014. – Т. 57. – №. 8-9. – С. 632-545.
- [4] Vladimirov A.P. Speckle tomography of the living-cell functions //Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. – V. 63. – Is. 8. – P. 592–604.
- [5] Владимиров А.П. и др. Спекл-диагностика необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и технических объектах. Оптические методы исследования потоков: Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня – 02 июля 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021, С. 51–62.

УДК 353.5:359.4

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ДВУХ СПЕКЛОВЫХ МЕТОДОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛА

Александр Петрович Владимиров*, Иван Сергеевич Каманцев*, Никита Александрович
Друкаренко*, Константин Евгеньевич Мызнов**, Константин Владиславович Наумов***

*Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

**Институт физики и металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

***Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Россия

Аннотация

Новый метод усредненных во времени спекловых изображений и известный метод интерференции двух спекл-полей были использованы для изучения пластических деформаций, возникающих при многоцикловой усталости металла. Объектом исследования был плоский образец с двумя симметричными выточками, изготовленный из стали 09Г2С. Образец подвергали циклическому деформированию с частотой около 100 Hz, коэффициент асимметрии цикла равнялся 0.1. Ранее новым методом на базе порядка 10 мкм была определена предельная локальная растягивающая деформация, соответствующая разрушению. Однако не было ясно, какова корректность полученных значений деформаций

Ключевые слова

Многоцикловая усталость, металл, разрушение, спеклы, интерференция, свободное поле, изображение

Благодарности

Работа поведена при частичной поддержке Уральского Федерального Университета, акт 211 правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006

COMPARISON OF DATA FROM TWO SPECKLE METHODS USED TO STUDY HIGH-CYCLE FATIGUE OF METAL

Alexander P. Vladimirov, Ivan S. Kamantsev, Nikita A. Drukarenko, Konstantin E. Myznov,
Konstantin V. Naumov

*Institute of Engineering Science UB RAS, Yekaterinburg, Russia

**Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev UB RAS, Yekaterinburg, Russia

***Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The new method of time-averaged speckle images and the well-known method of interference of two speckle fields were used to study plastic deformations that occur during high-cycle fatigue of metal. The object of the study was a flat sample with two symmetrical recesses made of steel 09G2S. The sample was subjected to cyclic deformation with a frequency of about 100 Hz, the cycle asymmetry coefficient was 0.1. Previously, the limit local tensile deformation corresponding to fracture was determined by a new method on a site of about 10 microns in size. However, it was not clear what the correctness of the obtained values of deformations was.

Keywords

High-cycle fatigue, metal, fracture, speckle, interference, diffraction field, image

Acknowledgements

The work was carried out with the partial support of the Ural Federal University, Act 211 of the Government of the Russian Federation, Agreement No. 02.A03.21.0006

Введение

При освещении когерентным светом шероховатой поверхности, а также прозрачного объекта через матовое стекло, в свободном пространстве и в плоскости изображения объектов образуется спекловая структура рассеянного излучения. Использование спекловых, а также других оптических и не оптических методов для изучения многоцикловой усталости материалов является актуальной задачей [1]. Путем регистрации на одном кадре трех спекловых изображений, соответствующих трем ракурсам

наблюдения, были найдены зависимости трех компонент вектора относительного перемещения точек поверхности от числа циклов деформации [2]. Полученное значение деформации по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при испытаниях стандартных образцов в условиях их квазистатического растяжения. Вследствие важности указанного совпадения, как с научной, так и с практической точки зрения, необходимо было оценить корректность определения деформаций новым методом. Целью исследования являлось: 1) определение необратимых относительных перемещений точек поверхности одновременно новым и известным методами; 2) изучить особенности локализации необратимых деформаций при разных амплитудах цикла.

Теория

Кратко рассмотрены теории двух использованных методов: метода интерференции двух спекл-полей в свободном пространстве и метода усредненных во времени спекловых изображений. Для конкретных условий эксперимента приведены две формулы, связывающие относительные перемещения точек поверхности и порядки интерференции в точке наблюдения.

Эксперименты

Объектом исследования был плоский образец с двумя симметричными выточками радиусом 2,5 мм. Образец подвергали циклическому деформированию с частотой около 100 Hz, коэффициент асимметрии цикла равнялся 0,1. Для использования двух методов были собраны две оптические системы, в которых использовались лазерные модули с разными длинами волн. Первая оптическая система использовалась для формирования двух спекловых изображений на одном кадре монохромной телекамеры. Во второй оптической системе луч лазера разделяли на два пучка, пучки фокусировали на два расположенные рядом участка поверхности в центре образца. Интерференционные полосы, возникающие в свободном пространстве в области наложения двух спеклов, регистрировали с помощью второй цветной телекамеры. Для разных амплитуд цикла двумя методами определяли зависимости порядка интерференции в точках наблюдения от числа циклов деформации. Показана корреляция данных, полученных двумя методами. Предельная растягивающая деформация в момент зарождения трещины достигает порядка 10^{-1} .

Заключение

Подтверждено, что в стали 09Г2С предельная растягивающая деформация в момент зарождения трещины достигает величины порядка 10^{-1} . Для разных амплитуд цикла в центре образца найдена очень хорошая корреляция относительных перемещений точек поверхности, зарегистрированных двумя методами.

Литература

- [1] Новиков И.И., Ермишин В.А. Физическая механика реальных материалов //М.: Наука. 2004. 328 с.
- [2] Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е. Использование спекловых изображений для определения локальных пластических деформаций, возникающих при многоциклового усталости стали 09Г2С //Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 15. – С. 35–38.

УДК 681.2.082

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СТРУКТУРЕ АВИАЦИОННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА И В ЗАДЕЛКЕ КАБИНЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Павел Владимирович Павлов*, Александр Петрович Владимиров**, Анатолий Романович Степанов*

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия*

***Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация

В работе представлены результаты натуральных испытаний метода спекл-структур оптического излучения для определения технического состояния внутренней и поверхностной структуры органического авиационного стекла марки АО-120 после воздействия агрессивной среды и ультрафиолетового излучения, а так же продемонстрированы возможности разработанного экспериментального образца аппаратно-программного комплекса спекл-лазерного контроля при определении выхода остекления из заделки при создании избыточного давления внутри кабины воздушного судна. Было установлено, что плотность распределения коэффициентов корреляции регистрируемых спекл-полей от образцов органического авиационного стекла зависит от степени повреждения поверхностного слоя после воздействия агрессивной среды. В результате определения степени выхода остекления из заделки установлено, что высокая чувствительность метода спекл-структур оптического излучения позволяет на начальном этапе создания избыточного давления внутри кабины фиксировать и определять величину перемещения остекления из заделки, тем самым определять состояние клеевого соединения внутри заделки

Ключевые слова

Спекл, деформация, дефект, остекление, неразрушающий контроль, разрушение, определение перемещений

Благодарности

Работа выполнена в рамках проведения научно-исследовательской работы «Ангара-19», авторы выражают слова благодарности Евсину Александру Олеговичу за организацию и подготовку в проведении натуральных испытаний

USING THE METHOD OF SPECKLE PATTERNS OF OPTICAL RADIATION TO DETERMINE DEFECTS IN THE STRUCTURE OF AVIATION ORGANIC GLASS AND IN THE SEALING OF THE AIRCRAFT CABIN

Pavel P. Pavlov, Alexander P. Vladimirov, Anatoly R. Stepanov

**MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia*

***Institute of Engineering Science UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

Abstract

The paper presents the results of full-scale tests of the method of speckle-structures of optical radiation to determine the technical condition of the internal and surface structure of organic aviation glass of the AO-120 brand after exposure to an aggressive environment and ultraviolet radiation, and also demonstrates the capabilities of the developed experimental sample of the hardware-software complex of the speckle-laser control when determining the exit of the glazing from the seal when creating excess pressure inside the aircraft cabin. It was found that the distribution density of the correlation coefficients of the recorded speckle fields from organic aviation glass samples depends on the degree of damage to the surface layer after exposure to an aggressive environment. As a result of determining the degree of glazing exit from the embedment, it was found that the high sensitivity of the optical speckle structure method allows, at the initial stage of creating excess pressure inside the cabin, to fix and determine the amount of glazing displacement from the embedment, thereby determining the state of the adhesive joint inside the embedment

Keywords

Speckle, deformation, defect, glazing, non-destructive testing, destruction, displacement detection

Acknowledgements

The work was carried out as part of the research work "Angara-19", the authors express their gratitude to Evsin Alexander Olegovich for organizing and preparing for field tests

Введение

С целью повышения безопасности полетов современных летательных аппаратов необходимо разрабатывать и внедрять новые способы и методики неразрушающего контроля, способные своевременно обнаруживать и предупреждать процессы развития опасных дефектов способных привести к разрушению элементов остекления в полете. Существующие методы и устройства дефектоскопического контроля, применяемые на производстве и в эксплуатирующихся авиационных подразделениях обладают низкой точностью и достоверностью результатов контроля при определении технического состояния остекления и внутренней заделки. Поэтому разработка новых инструментов дефектоскопического контроля элементов остекления кабин воздушных судов является актуальной научно-технической задачей.

Используемые методы и подходы

Для решения данной задачи предлагается использовать метод спекл-структур оптического излучения, который показал свою эффективность в ходе определения перемещений подводных объектов, скорости движения, поворотов, упругих и пластических деформаций тел, потоков жидкостей и газов [1–4]. Для определения внутренних дефектов в заделке остекления кабин предложен новый способ [5], для реализации которого была разработана конструкторская документация, по которой изготовлена оснастка для оптико-электронной системы регистрации спекл-полей от кабины воздушного судна, а также оригинальное программное обеспечение для определения величины перемещения элементов кабины воздушного судна.

Результаты и заключение

Анализ плотности распределения коэффициентов корреляции спекл-полей от образцов органического стекла АО-120 после воздействия агрессивной среды и ультрафиолетового излучения показал, что происходит увеличение числа наиболее поврежденных участков, а в гистограммах имеет место их удлинение и смещение пика в сторону отрицательных значений. Установлено, что метод спекл-структур оптического излучения имеет высокую чувствительность к перемещению элементов остекления кабины при изменении давления внутри кабины воздушного судна. Анализ изменения коэффициента корреляции секторов спекл-поля от стекла, герметика и балки позволяет сделать заключение о том, что каждый элемент конструкции кабины перемещается относительно оптической системы на разную величину, так как значение коэффициента корреляции в один и тот же промежуток времени имеет разные значения.

Литература

- [1] Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro-and microprocesses in deformable media //Optical Engineering. – 2016. – V. 55. – Is. 12. – P. 121727.
- [2] Владимиров А.П. и др. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами //Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127. – №. 5. – С. 870.
- [3] Павлов П.В., Вольф И.Э., Москвин Н.В. Применение метода спекл-структур оптического излучения в задачах неразрушающего контроля //Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2018. – №. 6 (6). – С. 112–122.
- [4] Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Павлов П.В., Евсин А.О. Спекл-диагностика элементов остекления кабин воздушных судов из органического стекла //Авиационная промышленность. – 2021. – №. 3–4. – С. 97-103.
- [5] Способ определения дефекта в заделке остекления кабины. Патент на изобретение 2759038, 09.11.2021. Заявка № 2021100337 от 11.01.2021.

УДК 535.4:57.08:57.021

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКСИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ЖИВЫЕ КЛЕТКИ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Юлия Александровна Михайленко, Елизавета Алексеевна Рогова, Александр Петрович Владимиров,
Алексей Анатольевич Бахарев, Александр Григорьевич Сергеев, Надежда Анатольевна Белоконова

ЕНИИВИ ФБУН ГНЦ ВБ “Вектор” Роспотребнадзора, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

Объектом исследования являлись клетки линии L-41, культивированные на прозрачной подложке, активность которых изучалась методом динамической спекл-интерферометрии. Целью работы было определение степени влияния разных физико-химических процессов на изменение физической величины, характеризующей активность живых клеток. Для достижения цели в питательный раствор были добавлены: дистиллированная вода, влияющая на изменение осмотического давления в клетке, хлорид цинка, оказывающий негативное влияние на процессы транспорта веществ через клеточную мембрану и хлоргексидин, блокирующий как процессы регуляции осмотического давления, так и транспорта веществ. Сделан вывод, что вклад процессов, регулирующих осмотическое давление в клетках и транспорт веществ через мембрану в численное значение параметра, характеризующего активность клеток, составляет 15 и 39 % соответственно

Ключевые слова

Спеклы, спекл-интерферометрия, культура клеток, активность клеток, токсичные вещества

STUDYING OF THE TOXIC SUBSTANCES EFFECT ON LIVING CELLS BY DYNAMIC SPECKLE INTERFEROMETRY

Yuliya A. Mikhaylenko, Elizaveta A. Rogova, Alexander P. Vladimirov, Aleksey A. Bakharev,
Alexander G. Sergeev, Nadezhda A. Belokonova

ERIVI, FBRI SRC VB “Vector” Rospotrebnadzor, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The investigated object was L-41 cells cultivated on a transparent substrate, the activity of which was studied by the dynamic speckle interferometry method. The aim of the work was to determine the degree of influence of various metabolic processes on the change in the physical parameter characterizing the living cell's activity. To achieve the goal, the following was added to the nutrient solution: distilled water, which affects the change in osmotic pressure in the cell, zinc chloride, which has a negative effect on the processes of substances transport through the cell membrane, and chlorhexidine, which blocks both the regulation of osmotic pressure and transport of substances. It was concluded that the contribution of the processes that regulate osmotic pressure in cells and the transport of the substance through the membrane to the numerical value of the parameter characterizing the activity of cells is 15 and 39%, respectively

Keywords

Speckles, speckle interferometry, cell culture, cell activity, toxic substances

Введение

В последнее десятилетие появилось большое число публикаций по изучению возможностей применения биоспеклов в медицине, растениеводстве, в том числе для контроля качества семян, мяса, овощей и фруктов. Однако, указанные исследования не дают ответа на вопрос: какие конкретно физико-химические процессы в клетках связаны с активностью биоспеклов. Актуальной задачей является создание физических моделей функционирования клеток в норме и при различных внешних воздействиях. Аналитическое решение задачи о динамике спеклов в плоскости изображения тонкого биологического объекта приведено в статье [1]. В статье [2] отражены ранее полученные авторами результаты исследования по установлению закономерностей изменения сигналов динамики

спеклов в пространстве и во времени в плоскости изображения монослоя культивированных на стеклянной подложке и размороженных клеток при больших оптических увеличениях и различных внешних воздействиях (изменение температуры окружающей среды, действие вируса).

Нами было показано, что в качестве параметра, характеризующего активность клеток, можно использовать физическую величину σ_u – среднеквадратичное отклонение разности оптических путей пар волн, зондирующих биологический объект. Однако не было ясно, какие процессы, и в какой степени оказывают влияние на значение σ_u . Целью данной работы было определение степени влияния трех химических веществ на изменение величины σ_u .

Объекты и методика исследования

В качестве объекта исследования использовались клетки линии L-41 KD/84. Излучение лазерного модуля ($\lambda = 532$ нм, $P = 20$ мВт) расширяли микро-объективом, через матовое стекло направляли на кварцевую кювету. Во внутренней полости кюветы размером $3 \times 19 \times 27$ мм, наполненной питательным раствором, располагалась прозрачная стеклянная подложка толщиной 1,5 мм с монослоем культивированных клеток. С помощью микрообъектива (11X) с пространственным разрешением ~ 2 мкм формировали спекловые изображения клеток. Для ввода кадров изображения в компьютер использовали монохромную телекамеру с матрицей (782×582 пикс., $8,3 \times 8,3$ мкм). Время экспозиции кадра равнялось 9 секундам. Температуру кюветы с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ определяли контактным термодатчиком. Оптическая система располагалась внутри электрического термостата с водяной рубашкой 3Ц-1125МУ4.2.

Для ингибирования физико-химических процессов в кювету с клетками вводили дистиллированную воду (20% от объема питательной среды), 0,025% раствор хлоргексидина и раствор хлорида цинка (5 мкг/мл). Конечная концентрация хлоргексидина в питательной среде составляла 0,0125%, хлорида цинка – 0,25 мкг/мл. Добавление дистиллированной воды в культуральную среду уменьшает ее осмолярность, приводит к быстрому увеличению объема клетки, тем самым оказывая негативное влияние на внутриклеточные процессы, хлорид цинка оказывает негативное влияние на процессы транспорта веществ через клеточную мембрану, хлоргексидин блокирует как процессы регуляции осмотического давления, так и транспорта веществ.

Результаты и заключение

Проведенные эксперименты показали, что добавление в питательную среду вышеуказанных веществ снижает активность культивированных на стеклянной подложке клеток. Показано, что добавление дистиллированной воды снижает величину σ_u на 15%, хлорида цинка – на 39%, хлоргексидина – на 46%.

Литература

- [1] Vladimirov A.P. Speckle Tomography of the Living-Cell Functions //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2021. – V. 63. – Is. 8. – P. 592-604.
- [2] Mikhailenko Y.A., Vladimirov A.P., Bakharev A.A. Speckle Dynamics in the Image Plane of a Monolayer of Cultured Cells //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2021. – V. 63. – Is. 8. – P. 612-624.

УДК 53.082.54

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Анастасия Михайловна Кожевникова, Антон Сергеевич Иванков, Дмитрий Владимирович Шитц,
Игорь Вячеславович Алексеенко

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация

Представлены результаты апробации метода регистрации и оценки параметров низкотемпературной плазмы, генерируемой при атмосферном давлении в импульсном режиме, методами цифровой голографической интерферометрии. В настоящее время нетермальная плазма находит свое применение в лечении септических осложнений или дерматитов и, таким образом, поиск методов оценки параметров плазмы (электронной концентрации) вызывает научный интерес

Ключевые слова

Цифровая голографическая интерферометрия, нетермальная плазма, диагностика плазмы, автоматизация эксперимента

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки РФ №FZWM-2020-0003 «Исследование новых материалов и методов плазмо- и фототерапии онкологических заболеваний, дерматитов и септических осложнений» 2020-2023 г

IMPLEMENTATION OF DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR PULSED PLASMA STUDIES

Anastasia M. Kozhevnikova, Anton S. Ivankov, Dmitry V. Schitz, Igor V. Alekseenko.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract

The results of digital holographic method application on low-temperature plasma estimation under atmospheric pressure in pulsed mode is presented. Recently, non-thermal plasma uses in the treatment of septic complications or dermatitis and thus the search for methods to estimate plasma parameters (electron concentration) is of scientific interest

Keywords

Digital holographic interferometry, nonthermal plasma, plasma diagnostics, experiment automation

Acknowledgements

This study was performed in accordance with the Government Assignment supported by the RF Ministry of education and science, Project No. FZWM-2020-0003 “Investigation of advanced materials and methods for plasma and phototherapy of oncological and skin diseases and septic complications” for the years 2020–2023

Введение

Низкотемпературная плазма успешно используется для лечения кожных заболеваний [1]. Это связано с тем, что поток такой плазмы содержит заряженные частицы (электроны и ионы), образует радикалы озона, азота и кислорода и создает УФ-излучение (в диапазоне 20–300 нм), что позволяет разрушать мембраны патогенных микроорганизмов. Для терапии кожных покровов применяется плазма, формирующаяся в импульсно-периодическом режиме, и существует проблема дозы воздействия такой плазмы, которая определяется величиной концентрации электронов. Известно, что для определения концентрации зондовые методы использовать очень трудно, а реализация спектральных методов оценки требует дорогостоящего оборудования. С другой стороны, возможно применение более доступных и простых методов, таких как цифровая голографическая интерферометрия.

В видимом спектральном диапазоне голографические методы позволяют определять концентрацию электронов диапазоне от 10^{16} см⁻³. Возможно также увеличение чувствительности метода [2, 3], в том числе за счет расширения динамического диапазона цифровых детекторов, используемых для записи голограмм.

Следует отметить, что исследование нетермальной медицинской плазмы методами цифровой голографической интерферометрии связано с рядом особенностей, которые необходимо учитывать в работе. Во-первых, поток плазмы представляет собой импульс с частотой от 5 кГц, а время генерации одной плазменной струи составляет 750 нс. Таким образом, все приборы должны быть точно синхронизированы с учетом времени срабатывания каждого из них. Во-вторых, генерация плазмы происходит в газовом потоке, который имеет большую плотность, и тепловые процессы в котором искажают требуемую информацию о плазме.

Используемые методы и подходы

В предлагаемой работе описан метод стробоскопической голографической интерферометрии, позволяющий проводить наблюдение и анализ плазмы, генерируемой с частотой 5 кГц и длительностью 750 нс. Синхронизация и управление устройствами осуществлялась с использованием программно-аппаратных средств National Instruments. Регистрация изображений осуществлялась по схеме записи голограмм сфокусированного изображения. Расчет разности фаз между двумя состояниями объекта, осуществлялся методом Фурье-анализа.

Результаты и заключение

В работе представлены результаты регистрации плазмы двух видов: плазменной дуги (рис. 1) и плазменной струи (рис. 2), которые генерировались в импульсном режиме. Низкотемпературная плазма обладает небольшой концентрацией электронов и ее вклад в фазовое распределение на интерферограммах невелик, для верификации метода был проведен эксперимент с регистрацией плазменной дуги, которая обладает большей плотностью. Разработанная методика регистрации таких процессов, в дальнейшем, должна позволить проводить оценку концентрации электронов в плазме.

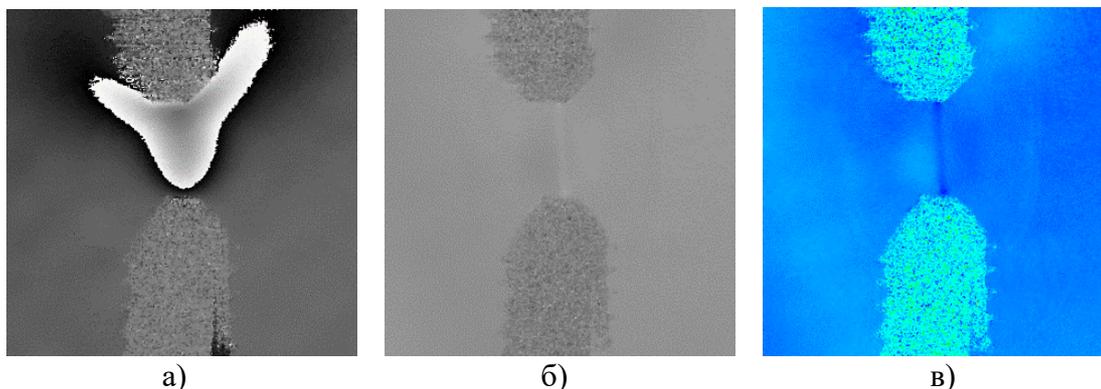


Рис. 1. Интерферограммы фазовых изменений, связанных с наличием плазменной дуги;
а – относительно неподвижного воздуха;
б – относительно воздуха между импульсами дуги (монохромное представление);
в – относительно воздуха между импульсами дуги (цветное представление)

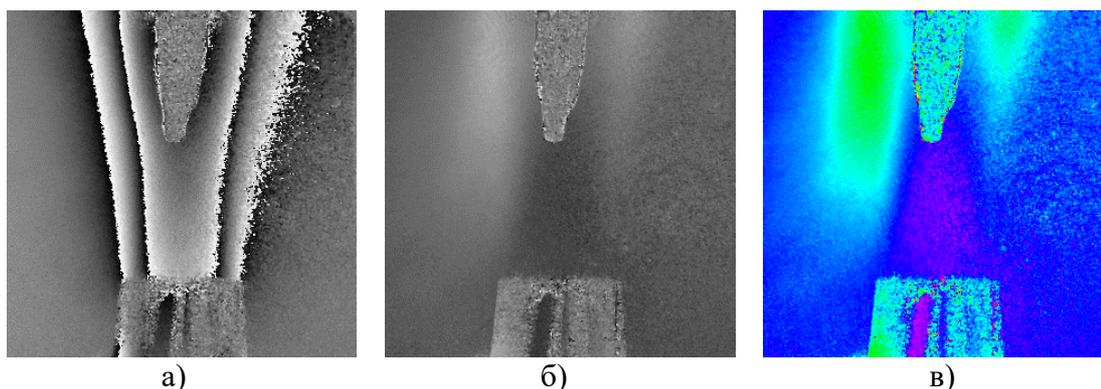


Рис. 2. Интерферограммы фазовых изменений, связанных с наличием плазменной струи в потоке газа;

а – относительно неподвижного воздуха;

б – относительно потока гелия между импульсами плазмы (монохромное представление);

в – относительно потока гелия между импульсами плазмы (цветное представление)

Литература

- [1] Weltmann K.D., Kindel E., von Woedtke T., Hähnel M., Stieber M., Brandenburg R. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine //Pure and Applied Chemistry. – 2010. – V. 82. – Is. 6. – P. 1223-1237.
- [2] Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Y.I. IV Holographic Methods of Plasma Diagnostics //Progress in optics. – Elsevier, 1985. – V. 22. – P. 197-270.
- [3] Зайдель А.Н. Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы //Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149. - №. 5. – С. 105–138.

УДК 535.417

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ СЛОИСТЫХ МИКРООБЪЕКТОВ В ОПТИЧЕСКОЙ
МИКРОСКОПИИ: ВЛИЯНИЕ УГЛОВОГО СПЕКТРА ОСВЕЩЕНИЯ**

Антон Андреевич Дьяченко

СГУ имени Чернышевского Н.Г., г. Саратов, Россия

Аннотация

Рассматривается теория формирования взаимного частотного спектра интерферирующих полей, отраженных границами слоистого микрообъекта в оптической микроскопии большого увеличения с учетом ширины углового спектра освещающего поля. Приводятся результаты моделирования интерференционных спектров при заданных параметрах освещающего поля, регистрирующей аппаратуры и параметров объекта. Рассматриваются методы анализа полученных спектров в контексте вопроса определения оптической толщины слоя микрообъекта. Показано влияние ширины углового спектра освещающего поля на структуру взаимного частотного спектра интерферирующих полей и представлены граничные условия применения конкретных спектральных методов для измерения оптических толщин слоев

Ключевые слова

Оптическая микроскопия, слоистые микрообъекты, тонкие пленки, спектральная интерферометрия, измерение оптических толщин, анализ интерференционных сигналов

**SPECTRAL METHODS ANALYSIS OF INTERFERENCE IMAGES OF STRATIFIED
MICROOBJECTS IN OPTICS MICROSCOPY**

Anton A. Dyachenko

Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russia

Abstract

Theory of forming of mutual frequency spectrum of the interference fields reflected by the layers of microobjects in optical microscopy with high magnification is considered. Effects of numeric aperture of the illumination field is described. Results of interference spectrums simulation for given parameters of the microscopic system (illumination field, recording equipment, objects parameters) are shown. Methods of received spectrum analysis are considered and problems of optical thickness measurements using these methods are discussed. Influence of numeric aperture of the illumination field on the interference spectrum are shown. Limits of application described methods for optical thickness measurements are presented

Keywords

Optical microscopy, stratified microobjects, thin films, spectral interferometry, optical thickness measurements, analysis of interference signals, interference image analysis

Введение

Одной из актуальных задач оптической когерентной микроскопии и томографии тонких слоистых объектов является определение их оптической толщины. В [1, 2] представлены разработанные методы измерения оптических толщин слоистых микрообъектов, основанные на анализе их цветных интерференционных изображений, формируемых в оптическом микроскопе. Данный метод отличается простотой реализации и позволяет проводить измерения оптических толщин как непосредственно при регистрации изображений, так и после регистрации. В [3] исследовано влияние ширины углового спектра освещающего поля на цвет интерференционного изображения и на точность измерения оптической толщины микрообъекта. Исследования и анализ полученных данных показали зависимость результатов колориметрического анализа

интерференционного изображения не только от ширины углового спектра освещающего поля, но и от выбора цветовой системы представления цветного изображения [2].

Формирование интерференционного спектра изображения слоистого микрообъекта

Для совершенствования методов измерения оптической толщины тонких слоев рассмотрена возможность анализа частотного спектра интерференционного поля изображений слоистых микрообъектов. В работе установлено, что в случае освещения прозрачного слоистого микрообъекта с одним слоем частотно широкополосным излучением спектральное распределение интенсивности поля изображения слоя $I(\lambda, d, NA_i)$ в некоторой его точке можно описать выражением:

$$I(\lambda, d, NA_i) = \int_0^{NA_i} I_1(\lambda, NA) NAdNA + \int_0^{NA_i} I_2(\lambda, NA) NAdNA + \\ + 2 \int_0^{NA_i} \sqrt{I_1(\lambda, NA) I_2(\lambda, NA)} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} 2dn \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n}\right)^2} \right] NAdNA,$$

где I_1, I_2 – частотные спектры полей, отраженных верхней и нижней гранями слоя, NA_i – числовая апертура освещающего поля, d – геометрическая толщина слоя, n – показатель преломления среды слоя.

Полученное выражение применялась для моделирования взаимных частотных спектров изображений слоев (Рисунок). При анализе полученных данных можно выделить три основные группы результатов, в зависимости от структуры полученных спектров.

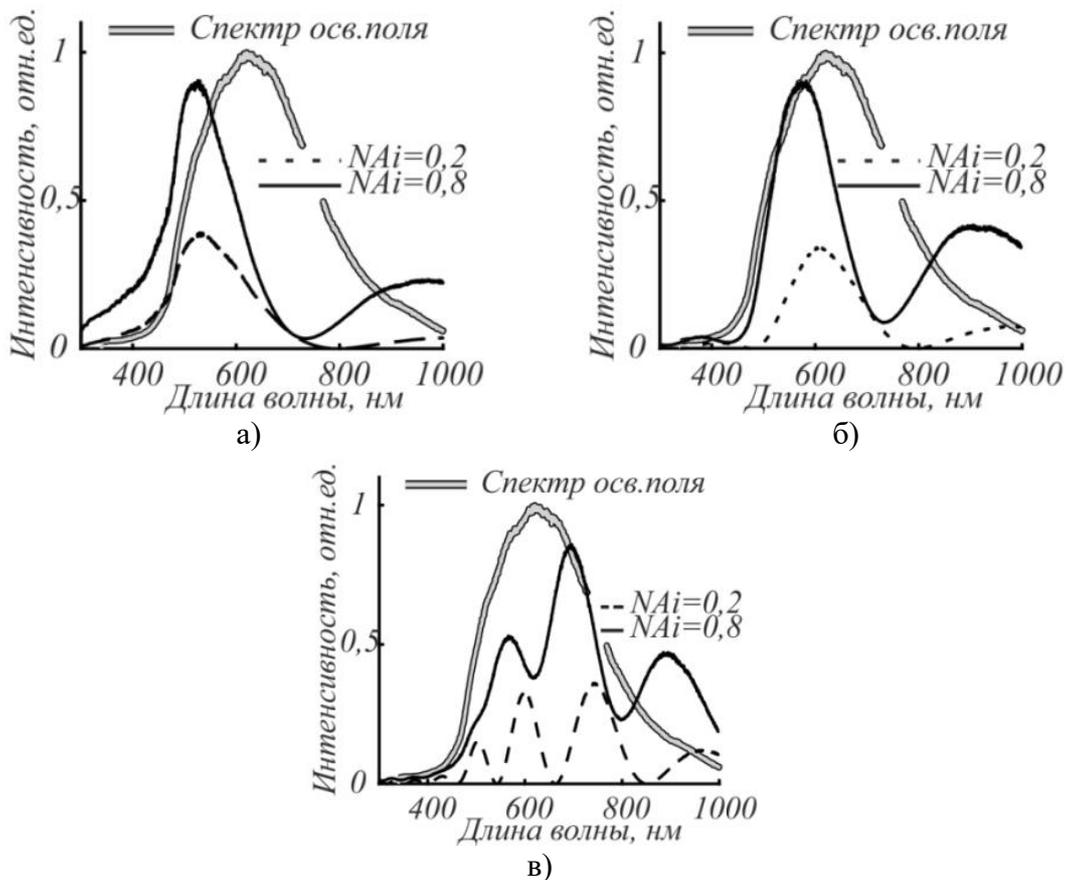


Рисунок. Теоретические частотные спектры интерференционного поля при различных значениях геометрической толщины слоистого микрообъекта:

а) $d=200$ нм; б) $d=600$ нм; в) $d=1500$ нм

Результаты и заключение

При увеличении толщины слоя микрообъекта наблюдается изменение структуры частотного интерференционного спектра (появление локальных провалов, осцилляций). При больших значениях толщины слоя в частотном спектре большое влияние начинает оказывать ширина углового спектра освещающего поля, приводящая к уменьшению амплитуды интерференционных осцилляций и сдвигу положений экстремумов этих осцилляций в шкале длин волн, что связано с уменьшением взаимной когерентности волновых полей, отраженных гранями слоя [4].

Литература

- [1] Дьяченко А.А. Определение оптических толщин слоистых объектов по интерференционным цветам изображений в микроскопии белого света / А.А. Дьяченко, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, – №5. – С. 670–679.
- [2] Дьяченко А.А. Проявление эффектов углового спектра освещающего поля в полихроматической интерференционной микроскопии слоистых объектов / Дьяченко А.А., Максимова Л.А., Рябухо В.П. // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, – №6. – С. 959–969.
- [3] Дьяченко А.А. Цветовые модели представления полихроматических интерференционных изображений тонких слоистых объектов в оптической микроскопии / А.А. Дьяченко, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, – №6. – С. 956–967.
- [4] Максимова Л.А. Мгновенные спекл-модулированные интерференционные изображения и когерентные эффекты в оптической микроскопии тонких слоев / Максимова Л.А., Мысина Н.Ю., Дьяченко А.А., Рябухо В.П. // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, – №1. – С. 80–94.

УДК 535.421; 535.417

ПЕРЕДАЧА 3D ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО РАДИОКАНАЛУ

Артём Леонович Пазоев, Сергей Александрович Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе приводятся результаты исследования возможности передачи голографической информации по обычному радиоканалу. Показано, что использование для этого двух основных модальностей 3D изображения – карты глубин голографируемого объекта и текстуры его поверхности достаточно для того, чтобы на приёмном конце канала связи синтезировать полноценную голограмму, восстанавливающую объект голографирования с непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом. Указанный метод передачи 3D голографической информации похож на известный в радиотехнике метод передачи информации на одной боковой полосе, когда из сложного сигнала вычитается несущая частота (SSB), однако обладает существенными отличиями, заключающимися в том, что пространственные частоты, образующие голограмму, являются результатом одновременной амплитудной и фазовой модуляции опорного сигнала, что затрудняет теоретический анализ. Поэтому экспериментальное подтверждение возможности такой передачи является актуальным. В работе показано, что передаваемый информационный поток достаточен, чтобы восстановленные голограммами на приёмном конце канала связи 3D голографическое изображение имело непрерывный горизонтальный и вертикальный параллакс, а пространственное разрешение восстановленного изображения было не хуже, чем в TV стандартах высокой чёткости, как, например Full HD

Ключевые слова

Голография, голографическая информация, метод SSB

TRANSMISSION OF 3D HOLOGRAPHIC INFORMATION VIA RADIO CHANNEL

Artem L. Pazoev, Sergey A. Shoydin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Abstract

The paper presents the results of a study of the possibility of transmitting holographic information over a conventional radio channel. It is shown that the use of two main 3D image modalities for this – a depth map of the holographic object and the texture of its surface is sufficient to synthesize a full-fledged hologram at the receiving end of the communication channel, restoring the holographic object with continuous vertical and horizontal parallax. This method of transmitting 3D holographic information is similar to the method of transmitting information on single sideband (SSB) known in radio engineering, when the carrier frequency is subtracted from a complex signal, however, it has significant differences, consisting in the fact that the spatial frequencies forming a hologram are the result of simultaneous amplitude and phase modulation of the reference signal, which complicates theoretical analysis. Therefore, experimental confirmation of the possibility of such a transfer is relevant. The paper shows that the transmitted information flow is sufficient so that the 3D holographic image restored by holograms at the receiving end of the communication channel has continuous horizontal and vertical parallax, and the spatial resolution of the restored image is not worse than in high-definition TV standards, such as Full HD

Keywords

Holography, holographic information, SSB method

Введение

Большие объёмы голографической информации, безусловно являющиеся большим преимуществом в других областях [1–5], в области голографического TV и задач дополненной реальности сыграли с разработчиками злую шутку, являясь одним из существенных препятствий передачи голографической информации по каналам связи. Это было отмечено в ряде работ [6, 7], где прямо говорилось, что мы ещё недостаточно знаем фундаментальные принципы голографии. Выходом из сложившегося противоречия

является либо существенное уменьшение размера голографического изображения, что плохо соответствует задачам дополненной реальности, либо сжатие голографической информации таким образом, чтобы её объём не превышал разумных пределов, т.е. возможностей современных каналов связи Wi-Fi. Следовательно, требуется поиск путей сжатия голографической информации и желательно без существенных потерь.

Постановка задачи

Согласно патенту [8], основная информация о 3D движущемся живом объекте голографирования содержится в потоке двух модальностей 3D изображения – карте глубин поверхности голографируемого объекта и текстуре его поверхности, что качественно имеет сходство с передачей сообщения на одной боковой полосе, без несущей (SSB), но отличается наличием одновременно и амплитудной и фазовой модуляции сигнала. Анализ спектров этих мод и созданной по ним голограммы показывает существенный разрыв, обеспечивающий окно возможностей для эффективного сжатия передаваемой информации. Однако прямые математические методы энтропийного сжатия оказываются неэффективными, на что указывают более, чем двадцатилетние поиски различных групп исследователей, среди которых находится и группа Pleno, имеющая авторские права на известный алгоритм JPEG [9].

Эксперимент по передаче 3D голографической информации, синтезу голограммы и восстановлению ей 3D изображения с непрерывным параллаксом

С помощью протокола FTP был проведён эксперимент по передаче голографической информации по беспроводному каналу связи Wi-Fi с помощью двух основных модальностей 3D изображения (Рисунок).

В работе показано, что такая передача данных позволяет передавать полную 3D информацию о голографируемом объекте по обычному каналу связи.

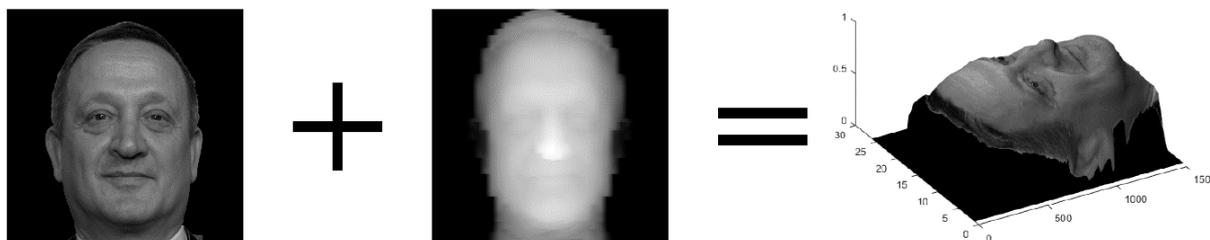


Рисунок. Принципиальная схема передачи 3D информации

В качестве голографической информации, т.е. предварительных 3D-кадров для «голографического видео» нами была использована серия кадров с 3D-портретом человека. Время съёмки зависит от используемой аппаратуры и поэтому не учитывалось.

Результаты объективных измерений времени передачи пакетов были собраны и обработаны. По переданным по каналу связи 3D голографическим изображениям были синтезированы голограммы и были восстановлены как виртуальные 3D голографические изображения [10–11], обладающие и вертикальным, и горизонтальным параллаксом, так и их материальные аналоги, в технологии Dot Matrix [12, 13].

Заключение

В работе с помощью протокола FTP была проведена экспериментальная передача 3D голографической информации по беспроводному каналу связи Wi-Fi для имитации 3D видео. Проведён синтез голограммы на приёмном конце канала связи и восстановление 3D изображения, обладающего непрерывным параллаксом и пространственным разрешением TV высокой чёткости, как FullHD и TV частотой кадровой развёртки.

Литература

- [1] Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю. Н. Денисюк // Оптика и спектроскопия. – 1963. – Т. 15. – № 4. – С. 522–532.
- [2] Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory //JOSA. – 1962. – V. 52. – Is. 10. – P. 1123-1130.
- [3] Leith E.N., Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects //Josa. – 1964. – V. 54. – Is. 11. – P. 1295-1301.
- [4] Van Heerden P.J. A New Optical Method of Storing and Retrieving Information / P.J. van Heerden // Applied Optics. – 1963. – V. 2. – Is 4. – P. 387-392.
- [5] Hill B. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory / B. Hill // Applied Optics. – 1972. – V. 11. – Is 1. – P. 182-191.
- [6] Титарь В.П., Богданова Т.В. Проблемы создания голографической телевизионной системы //Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – №. – № 7. – С. 38–42.
- [7] Денисюк Ю.Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? / Денисюк Ю.Н., // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 149–161.
- [8] Шойдин С.А. Способ дистанционного формирования голографической записи. Патент RU2707582C1, Российская Федерация, МПК G03H 1/00; заявл. 03.07.2018; опубл. 28.1.2019.
- [9] Muhamad R. K. et al. JPEG Pleno holography: scope and technology validation procedures //Applied optics. – 2021. – V. 60. – Is. 3. – P. 641-651.
- [10] Shoidin S.A., Pzoev A.L. Remote Formation of Holographic Record //Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – V. 57. – Is. 1. – P. 80-88.
- [11] Шойдин С.А., Пазоев А.Л. Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе //Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 3. – С. 79-88.
- [12] Шойдин С.А. и др. Синтезированные на приёмном конце канала связи голограммы 3D-объекта в технологии Dot Matrix //Компьютерная оптика. – 2022. – V. 46. – Is. 2. – P. 204–213.
- [13] Шойдин С.А., Пазоев А.Л., Цыганов И.К., Дроздова Е.А. Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе //Тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HoloExpo 2021. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2021. – P. 109–117.

УДК 535:004.932.72'1

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ
МНОГОЦВЕТНОМ ФОНЕ**

**Елизавета Кирилловна Петрова, Дмитрий Сергеевич Гончаров, Ростислав Сергеевич Стариков,
Евгений Юрьевич Злоказов**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» г. Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты применения инвариантных фильтров для распознавания изображений объектов на естественном многоцветном фоне. Показаны возможности применения различных алгоритмов предобработки входных изображений, а также представлены различные метрики, в том числе нейросетевые, для анализа выходных корреляционных сигналов

Ключевые слова

Инвариантные корреляционные фильтры, ПВМС, коррелятор, нейронные сети

**APPLICATION OF INVARIANT FILTERS FOR CORRELATION RECOGNITION OF
IMAGES OF OBJECTS ON A NATURAL MULTICOLOR BACKGROUND**

Elizaveta K. Petrova, Dmitriy S. Goncharov, Rostislav S. Starikov, Evgenii Yu. Zlokazov

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Abstract

The results of applying of the invariant filters for recognition of complex noisy objects are presented. The possibilities of using various algorithms for preprocessing input images are shown. Various metrics, including neural networks, are presented for analyzing output correlation signals

Keywords

Invariant correlation filters, SLM, correlator, neural networks

Введение

В настоящее время задача распознавания объектов является крайне актуальной. Одним из решений является применение различных численных методов, включая использование нейронных сетей. Другой подход основан на использовании таких математических алгоритмов, реализация которых возможна в оптических вычислительных системах [1, 2]. При этом первый подход позволяет достичь высокой точности, а второй подход обеспечивает быстроту и энергоэффективность. В данной работе были объединены оба подхода для решения задачи распознавания объектов на естественном фоне.

Используемые подходы

Широко известен метод инвариантной корреляции – алгоритм распознавания изображений, вычисления в котором могут быть полностью реализованы в когерентной оптической системе благодаря способности оптических линз выполнять преобразование Фурье проходящего через них излучения [1]. Для применения метода инвариантной корреляции необходимо синтезировать инвариантный фильтр (ИФ) – эталонный объект, с которым сравниваются входные изображения [2]. В процессе синтеза в ИФ закладывается дополнительная информация об объектах и возможных искажениях с целью обеспечить инвариантность.

Используемые в данной работе изображения (рисунок) подвергаются предобработке. Например, могут быть выделены некоторые особенности изображений, такие как красная линия на машине скорой помощи (рис. а). Обработанные изображения вводятся в когерентный оптико-цифровой коррелятор, где аналоговым методом формируется сигнал, пространственное распределение амплитуды которого соответствует кросскорреляционной функции изображения и ИФ. Далее корреляционный сигнал обрабатывается с использованием корреляционных метрик [1, 3] или выполняется его нейросетевая обработка, что позволяет достичь лучшей точности распознавания объектов. Комбинация оптической части и нейросетевой обработки позволяет с одной стороны сохранить высокую скорость и энергоэффективность системы распознавания в целом, а с другой стороны обеспечить достаточную точность распознавания [4].



Рисунок. Примеры используемых изображений

Заключение

Проведена серия численных экспериментов по распознаванию сложных объектов на естественном фоне. Показаны результаты по распознаванию корреляционных сигналов, полученных с помощью коррелятора совместного преобразования. ИФ синтезировался двумя различными способами: использовались все цветные каналы изображения (RGB), а также только красный цветовой канал. В качестве распознаваемых изображений использовались изображения объектов, взятые из открытых источников. Для серии изображений были получены корреляционные сигналы, обработанные затем метриками PSR, PCE, а также была выполнена нейросетевая обработка корреляционных сигналов. Полученные корреляционные сигналы демонстрируют эффективность корреляционного распознавания при различных практических постановках задач. А использование нейросетевой обработки позволяют учесть вид корреляционного сигнала, и повысить качество распознавания.

Литература

- [1] Kumar B.V.K.V. et al. Correlation Pattern Recognition //Cambridge University Press, 2005.
- [2] Evtikhiev N.N. et al. MINACE Filters: Recognition of the Images Received from Various Independent Sources //Physics Procedia. – 2015. – V. 73. – P. 246-250.
- [3] Петрова Е.К. и др. Особенности применения инвариантных корреляционных фильтров для распознавания цветных субпиксельных изображений //Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 8. – С. 672-679.
- [4] Goncharov D., Starikov R. Improving correlation method with convolutional neural networks //arXiv preprint arXiv:2004.09430. – 2020.

УДК 536.46

ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ ФАКЕЛЬНОГО ПЛАМЕНИ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Александр Николаевич Лепаев*, Сергей Иванович Ксенофонов**,
Ольга Васильевна Васильева***

*Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета г. Чебоксары, Россия

**Чувашский государственный педагогический университет имени И.Я. Яковлева, г. Чебоксары, Россия

***Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация

Цифровое изображение факела распыленной горючей жидкости (этанола) обработано с помощью электронного фильтра. Установлены геометрические размеры светящегося факела, выделены зоны факела по уровню яркости с высоким пространственным и временным разрешением, определена сила излучения каждой выделенной зоны

Ключевые слова

Горение, жидкость, распыл, изображение, оптическая обработка, яркость, сила излучения

OPTICAL IMAGE PROCESSING OF A SPUTTERED LIQUID FLAME

Alexander N. Lepaev, Sergey I. Ksenofontov, Olga V. Vasilyeva

*Cheboksary Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Russia

** Chuvash State Pedagogical University named after I. Y. Yakovlev, Cheboksary, Russia

***Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

Abstract

The digital image of the torch of the sprayed combustible liquid (ethanol) is processed with the help of an electronic filter. The geometric dimensions of the luminous torch are determined, the torch zones are identified according to the brightness level with high spatial and temporal resolution, the radiation strength of each selected zone is determined

Keywords

Combustion, liquid, spray, image, optical processing, brightness, radiation strength

Для улучшения смесеобразования и полноты сгорания горючие жидкие топлива сжигаются в камерах сгорания в распыленном виде. Образовавшийся факел имеет яркостные и температурные неоднородности.

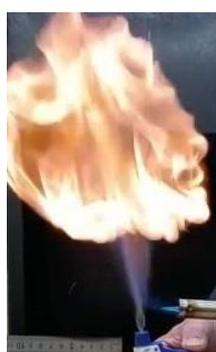
В данной работе рассмотрена структура факела распыленной горючей жидкости. С помощью разработанных программных средств выделены зоны факела с одинаковыми свойствами, определена форма и размеры основного светящегося тела факела [1, 2]. В качестве горючей жидкости выбран этанол. При горении этанола в воздухе образуется почти прозрачное пламя.

При факельном сжигании капли жидкости частично успевают испариться и образуют парофазное пламя. Оставшаяся часть капли продолжает испаряться, но под воздействием теплового потока молекулы жидкости подвергаются пиролизу. При пиролизе образуются сложные осколки молекул, поэтому останки капель сильно светятся. Группа светящихся частиц образуют в факеле зону с аномально высоким излучением.

Изображение разбивается на строки и элементы в строке – пиксели. Каждый пиксель характеризуется уровнем градации яркости. Электронный фильтр пробегает последовательно по каждой строке, оцифровывая каждый пиксель по уровню яркости. Уровень яркости значительно отличается от уровня яркости фона изображения. Программные средства позволяют определить в каждой строке ширину факела. В этом случае площадь яркой зоны будет определяться как произведение ширины зоны на высоту

строки, а площадь светящегося факела – как суммарная площадь этих зон. Программные средства позволяют находить в пределах изображения пиксели одинаковой яркости, последовательность которых отображается в виде линии одинаковой яркости – изофоты. Семейство изофот с разным уровнем градации яркости выделяет в факеле зоны, каждая из которых обладает своими яркостными свойствами. Светящее тело факела ограничено изофотами с максимальным значением яркости.

На рисунке приведено изображение факела через 120 мс после впрыска жидкости. Дежурное пламя воспламеняет факел у основания. Воспламененная капля в факеле по эстафете воспламеняет близлежащие капли. В паровоздушном пламени скорость распространения составляет около 50 см/с.



а)



б)

L, о.е.	dS, мм ²	I, о.е.
255	1374,5	1374,5
230	8550	7695
204	6280,8	5024,6
179	6091,6	4264
153	4400,6	2640
127	1951,6	976
102	1829	731,6
Σ	32264,5	22706

в)

Рисунок. Изображение факела: а) прямая съемка; б) изофоты; в) параметры факела

После воспламенения факела происходят изменения, как уровня яркости, так и его геометрических размеров. Результаты обработки изображения с помощью программных средств приведены в таблице (рис. в). В первом столбце таблицы указаны градации уровня яркости в относительных единицах (о.е.). Уровень яркости фона изображения равен 100 о.е. Во втором столбце приведены значения площади каждой зоны, в последней строке – значение площади факела. В третьем столбце приведены значения силы излучения каждой зоны, в последней строке – значение силы излучения факела. Приведенные значения соответствуют времени 120 мс после впрыска жидкости. Конвективные потоки уносят горящий турбулентный факел вверх, усиливается смесеобразование.

Заключение

Показано, что оптические методы обработки изображения увеличивают возможности диагностики факела с пространственным разрешением в 1 мм с градацией уровня яркости 150 о.е. и временем регистрации 40 мс. В факеле выявлены зоны максимальной яркости и области их локализации.

Литература

- [1] Программа расчета распределения яркости пламени по оптическому изображению [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2008/11.doc> (дата обращения 12.03.2022).
- [2] Программа «Flame – candel» для определения силы света пламени жидких углеводородов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2009/7.doc> (дата обращения 12.03.2022).

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 535.41

ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ КАМЕРЫ И СПЕКЛ-ШУМА В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ 3D-МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Александр Валерьевич Козлов, Владислав Геннадьевич Родин, Павел Аркадьевич Черёмхин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Аннотация

К числу важных задач реконструкции изображений, в том числе с цифровых голограмм относится снижение влияния шумов. В работе предлагается метод подавления шумов на основе применения 3D-фильтрации к набору некоррелированных цифровых голограмм. Получено повышение качества восстановления по сравнению с другими методами подавления шумов

Ключевые слова

Шум, спекл-шум, дробовой шум, неоднородность фоточувствительности, 3D медианная фильтрация

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22–29–00603

RECORDING CAMERA AND SPECKLE NOISE REDUCTION BY 3D-MEDIAN FILTRATION IN DIGITAL HOLOGRAPHY

Alexander V. Kozlov, Vladislav G. Rodin, Pavel A. Cheremkhin

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

Abstract

Noise reduction is one of important task in digital holography and image reconstruction. Method of noise suppression by uncorrelated holograms 3D-filtering is proposed. Reconstruction quality was improved in comparison with other algorithms

Keywords

Noise, speckle-noise, shot photon noise, photo response non-uniformity, 3D median filtration

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant no. 22-29-00603

Введение

Цифровая голография активно применяется в областях, где требуется высокое пространственное разрешение, например, в микроскопии и неразрушающем контроле [1]. Шумы камеры [2], а также спекл-шумы [3] существенно снижают качество восстановленного изображения. В связи с этим разработаны программные и аппаратные подходы подавления шумов: усреднение изображений, восстановленных с голограмм с различным распределением спеклов; компьютерные фильтры на основе простых операций, локальных оценок, сложных преобразований и др. Каждый подход имеет свои ограничения: аппаратный требует большого количества голограмм, а программный имеет предел по увеличению качества. В связи с этим предлагается метод 3D-фильтрации, в его основе лежит фильтрация изображений, восстановленных с некоррелированных голограмм, как 3D-массива.

Предлагаемый метод и полученные результаты

Предлагается метод 3D-фильтрации. В основе лежит фильтрация изображений, восстановленных с некоррелированных голограмм, как 3D-массива. Окно фильтра (например, 3D-медианного) –это параллелепипед с продольным размером, равным числу

голограмм. Для апробации метода синтезирован набор из 90 голограмм Френеля объекта размером 128×128 пикселей (рис. 1а). На голограммы наложены дробовой фотонный шум, пространственная неоднородность чувствительности пикселей и спеклы. Восстановленное изображение дано на рис. 1б, а результаты фильтрации - на рис. 1(в-д) и рис. 2.

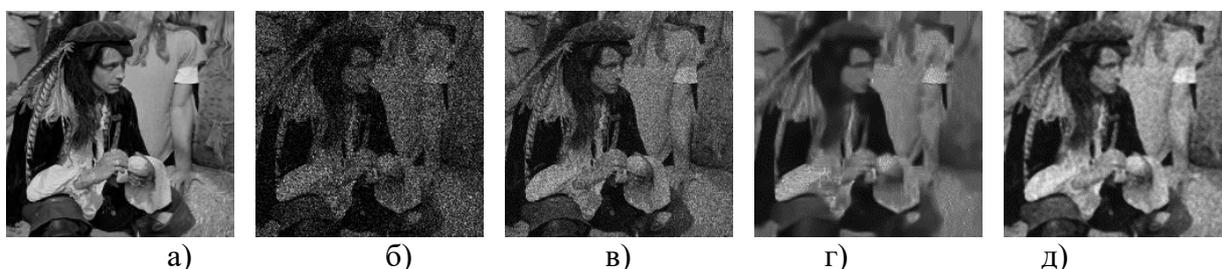


Рис. 1. Исходное изображение (а), восстановленное изображение до фильтрации (б) и после усреднения (в), фильтра VM3D (г) и 3D-медианной фильтрации (д)

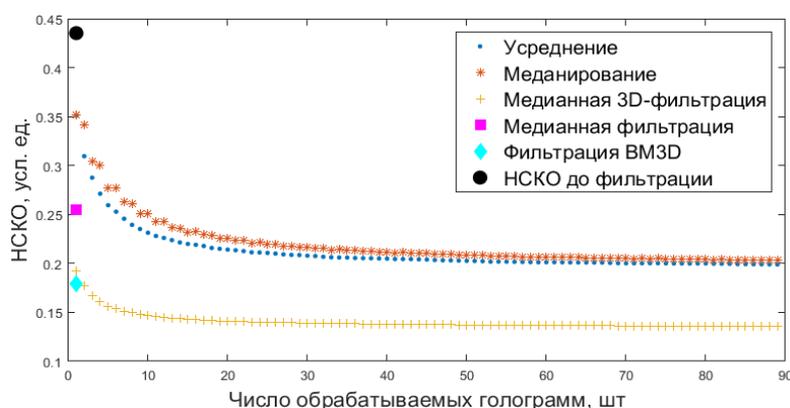


Рис. 2. График зависимости качества восстановления (по величине НСКО) от числа зарегистрированных некоррелированных цифровых голограмм

Заключение

Как видно, медианная 3D-фильтрация даёт лучшие результаты, чем другие представленные методы. Так, метод лучше по величине НСКО на 32%, относительно усреднения. По сравнению с VM3D значения оказываются лучше на 24% по величине НСКО. Таким образом предложенный метод позволяет эффективно снизить влияние шумов на качество изображения при использовании меньшего числа восстановленных изображений (см. рис. 1д). Метод применим в микроскопии и дефектоскопии, а также других областях, где требуется повышение качества восстановленного с голограммы изображения.

Литература

- [1] Javidi B. et al. Roadmap on digital holography //Optics Express. – 2021. – V. 29. – Is. 22. – P. 35078-35118.
- [2] Cheremkhin P.A. et al. Shot noise and fixed-pattern noise effects on digital hologram reconstruction //Optics and Lasers in Engineering. – 2021. – V. 139. – P. 106461.
- [3] Bianco V. et al. Strategies for reducing speckle noise in digital holography //Light: Science & Applications. – 2018. – V. 7. – Is. 1. – P. 1-16.

УДК 535.423

СЕКТОРНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Яна Евгеньевна Акимова, Михаил Владимирович Брецько, Александр Владимирович Воляр,
Юрий Александрович Егоров, Сервер Искандарович Халилов

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

Аннотация

В данной работе представлены исследования структурной устойчивости спирального пучка, подверженного секторному возмущению. Секторное возмущение приводит к изменению направления циркуляции линий тока вектора Пойнтинга в области возмущения, которые связаны с появлением вихрей с противоположными топологическими зарядами. Однако к изменению орбитального углового момента пучка такие возмущения не приводят, несмотря на рост числа вихревых мод, и возмущенный пучок остается структурно устойчивым.

Ключевые слова

Оптические вихри, спиральный пучок, орбитальный угловой момент, оптические токи

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект #20–37–90068. и грантом Государственного совета Республики Крым

SECTOR PERTURBATION OF SPIRAL VORTEX BEAMS

Yana. E. Akimova, Mikhail V. Bretsko, Alexander V. Volyar, Yuriy A. Egorov, Server I. Khalilov

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Abstract

This paper presents studies of the structural stability of a spiral beam subjected to sector perturbations. Sector perturbation causes a change in the direction of circulation of the streamlines of the Poynting vector in the area of perturbation, which are caused by the appearance of vortices with negative topological charges. However, such perturbations do not cause a change in the orbital angular momentum of the beam, despite the increase in the number of vortex modes, and the perturbed beam remains structurally stable

Keywords

Optical vortices, spiral beam, orbital angular momentum, optical currents

Acknowledgements

Financial support from Russian Foundation for Basic Research under the grant #20-37-90066 is gratefully acknowledged and grant from the State Council of the Republic of Crimea in the part “Spiral vortex beams”

Введение

Особый интерес к структурно устойчивым вихревым пучкам связан с необыкновенным свойством таких пучков сохранять свою структуру после прохождения через препятствия [1], с другой стороны, с возможностью использования скрытой симметрии пучка в самых разнообразных областях науки и техники от квантовой механики [2] до компьютерных технологий [3], от систем захвата и транспортировки микрочастиц до генетики и молекулярной биологии [4]. К структурно устойчивому классу относятся спиральные вихревые (СВ) пучки, открытые более чем 20 лет назад профессором Абрамочкиным и профессором Волостниковым [5], сохраняющих свою форму при распространении с точностью до масштаба и поворота. Целью представленной работы является исследование структурной устойчивости СВ пучков, подверженных секторному возмущению.

Используемые методы и подходы

В качестве СВ пучка использовался семи квантованный треугольный пучок с углом поворота $\theta = -1$ [5]. Возмущение задавалось в виде непрозрачного сектора, вершина которого совпадает с осью пучка. Комплексную амплитуду возмущенного СВ пучка треугольной формы запишем в виде:

$$\Psi \Delta (X, Y, Z | \alpha) = \sum_{m=0}^{\infty} C_{3m+1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{3m+1,n}(\alpha) LG_{0,n}(X, Y, Z), \quad (1)$$

где C_{3m+1} - амплитудные коэффициенты Лагерр-Гауссовых (ЛГ) мод, входящих в состав СВ пучка, $C_{m,n}(\alpha)$ - амплитудные коэффициенты каждой возмущенной ЛГ моды, которые определяются как

$$C_{m,n}(\alpha) = (-1)^{m-n} \Gamma\left(\frac{|m|+|n|}{2} + 1\right) \frac{\sin\left[\frac{(m-n)(\pi-\alpha)}{2}\right]}{m-n} / \left(\pi 2^{\frac{|m|-|n|}{2}} |n|\right). \quad (2)$$

Для оценки структурной устойчивости осуществлялось построение линий тока вектора Пойнтинга, которые содержат тонкие детали процесса разрушения сингулярной структуры. В отличие от лучей, линии тока очерчивают сложные траектории в окрестности особых точек. Форма линий тока определяется градиентом фазы СВ пучка $\nabla(\Phi \Delta)$, $\nabla = \mathbf{i}\partial_x + \mathbf{j}\partial_y + \mathbf{k}\partial_z$, и записывается как [6]:

$$\mathbf{J} \Delta (\mathbf{r}) = \text{Im}(\Psi^* \Delta \cdot \nabla \Psi \Delta). \quad (3)$$

Линии оптического тока в невозмущенном треугольном пучке характеризуются системой сепаратрис с одинаковыми направлениями циркуляции. Две сепаратрисы внутри каустики охватывают по три центра, расположенные на местах оптических вихрей. Каждая тройка центров образует три вершины правильных треугольников. Слабое возмущение непрозрачным сектором частично разрушает пучок, вырезает два вихря внутри пучка и затрагивает вихрь на оси пучка, но существенно не изменяет внутреннюю структуру линий тока.

Орбитальный угловой момент (ОУМ) пучка определялся по формуле:

$$\ell_z = \sum_{m=0}^N C_{3m+1} \sum_{n=-M}^M n \bar{C}_{m,n}^2, \quad (4)$$

где $\bar{C}_{m,n} \rightarrow C_{m,n} \sqrt{\pi 2^{-2-m} m!}$. ОУМ на участке $\alpha \in (0, \pi/2)$ практически не изменяется, и только вблизи угла $\alpha \sim 170^\circ$ возникает резкое падение ОУМ.

Результаты и заключение

Используя методы компьютерного моделирования и измерение амплитуд собственных мод ЛГ пучков, мы исследовали свойство спиральных пучков треугольной формы сохранять структурную устойчивость, несмотря на значительные секторные возмущения. Было обнаружено, что секторное возмущение вызывает существенные искажения картины линий тока в области тени секторной диафрагмы. Тем не менее, они имеют одинаковое направление циркуляции на всей площади поперечного сечения пучка при небольших углах возмущения. При больших углах секторной диафрагмы появляются широкие участки сечения пучка с противоположной циркуляцией линий тока. Оказалось, что ОУМ остается неизменным в широкой области углов возмущения, несмотря на

быстрый рост числа состояний, и только при углах сектора около 170° возникает резко падение ОУМ.

Литература

- [1] Aiello A., Agarwal G.S. Wave-optics description of self-healing mechanism in Bessel beams //Optics Letters. – 2014. – V. 39. – Is. 24. – P. 6819-6822.
- [2] Erhard M., Fickler R., Krenn M., Zeilinger A. Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions //Light: Science & Applications. – 2018. – V. 7. – Is. 3. – P. 17146-17146.
- [3] Marrucci L., Karimi E., Slussarenko S., Piccirillo B., Santamato E., Nagali E., Sciarrino F. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications //Journal of Optics. – 2011. – V. 13. – Is. 6. – P. 064001.
- [4] Rubinsztein-Dunlop H. et al. Roadmap on structured light //Journal of Optics. – 2016. – V. 19. – Is. 1. – P. 013001.
- [5] Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams: optical and quantum aspects //Optics Communications. – 1996. – V. 125. – Is. 4-6. – P. 302-323.
- [6] Berry M.V. Optical currents //Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2009. – V. 11. – Is. 9. – P. 094001.

УДК 535.423

ВОЗМУЩЕНИЕ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНОГО СПИРАЛЬНОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА СВЕТА НЕПРОЗРАЧНЫМ ЭКРАНОМ

Михаил Владимирович Брецько, Яна Евгеньевна Акимова, Александр Владимирович Воляр,
Юрий Александрович Егоров, Сервер Искандарович Халилов

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

Аннотация

В данной работе рассмотрено возмущение квадратного спирального вихревого пучка непрозрачным экраном. Показано, что если экран не перекрывает область максимума спирального пучка, то он способен восстановить прежнюю форму в дальней зоне дифракции. Если же возмущение, даже локально перекрывает яркую область пучка, то возмущенный пучок переходит в новое устойчивое состояние через цепочки рождения и аннигиляции оптических вихрей

Ключевые слова

оптический вихри, структурная устойчивость, спиральный вихревой пучок, вихревой спектр

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект #20–37–90066. и грантом Государственного совета Республики Крым

PERTURBATION OF QUADRATIC SPIRAL VORTEX BEAM BY OPAQUE SCREEN

Mikhail V. Bretsko, Yana. E. Akimova, Alexander V. Volyar, Yuriy A. Egorov, Server I. Khalilov

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Abstract

In this paper, we consider the perturbation of a quadratic spiral vortex beam by an opaque screen. It is shown that if the screen does not overlap the region of the maximum of the spiral beam, then it is able to restore its previous shape in the far diffraction zone. If the perturbation, even locally overlaps the bright region of the beam, then the perturbed beam passes into a new stable state through the chains of creation and annihilation of optical vortices

Keywords

Optical vortices, structural stability, spiral beam, vortex spectrum

Acknowledgements

Financial support from Russian Foundation for Basic Research under the grant #20-37-90066 is gratefully acknowledged and grant from the State Council of the Republic of Crimea in the part “Spiral vortex beams”

Введение

Среди огромного разнообразия вихревых структурированных лазерных пучков [1] особое место занимают, так называемые спирально-вихревые (СВ) пучки [2–4], которые содержат бесконечное число мод Лагерра-Гаусса (ЛГ) в своем массиве. СВ пучки могут формировать различные распределения интенсивности в виде многоугольников, спиралей, букв и даже слов. Амплитуды и фазы мод ЛГ в СВ пучках жестко связаны между собой, поэтому проблема их устойчивости к внешним возмущениям является ключевой для их применения в различных технических разработках.

Целью данной работы является исследование устойчивости четырехугольного СВ пучка под действием непрозрачного экрана. В процессе рассмотрения будем использовать методы компьютерного моделирования совместно с экспериментом.

Модель пучка и метод анализа

Комплексную амплитуду СВ пучка с четырехугольной образующей можно представить в виде суммы пучков ЛГ с определенными амплитудами и фазами:

$$\Psi(\mathbf{r}|\zeta) = \sum_{m \geq 0} c_m LG_{0,m}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где коэффициенты разложения задаются $c_m = \frac{2^m}{m!} \int_0^{2\pi} \zeta^{*m}(t) \exp\{-|\zeta(t)|^2 + i\Phi(t|\zeta)\} |\zeta'(t)| dt$, а

$\zeta(t)$ - образующая:

$$\zeta(t) = \zeta(t) = i\sqrt{\frac{200n}{3453}} e^{it} \left(3 - \frac{7}{20} e^{-4it} \right), \quad t \in [0, 2\pi], \quad (2)$$

где n – число квантования. Для четырехугольного СВ пучка достаточно взять первых 8 мод ЛГ с индексами $4m$. Типичное распределение интенсивности СВ пучка на фоне возмущения непрозрачным экраном, а также распределение фазы и вихревой спектр ЛГ мод представлены на рисунке 1.

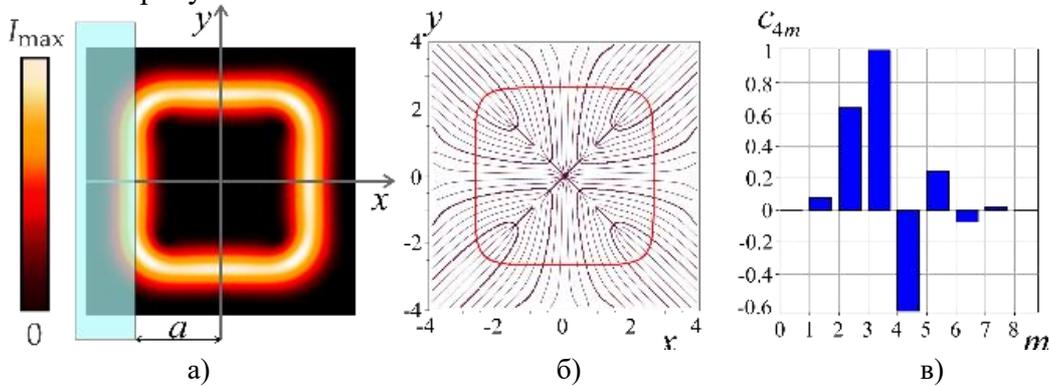


Рис. 1. (а) - распределение интенсивности; (б) - распределение фазы на фоне образующей; (в) - спектр вихрей СВ пучка

Непрозрачный экран помещен вдоль оси x , как показано на рис. 1а. Распределение интенсивности в возмущенной области несколько искажено (рис. 2). Во внешней области пучка появляются слабые минимумы и максимумы, что сразу несколько ухудшает распределение интенсивности вдоль остальной части пучка, а в возмущенной области картины фазового распределения появляются два дополнительных оптических вихря. При распространении происходит внутренняя перестройка картины оптических вихрей (рис. 2, $Z=1$), частично искажается форма каустики. В дальней зоне дифракции (рис. 2, $Z=30$) форма образующей восстанавливается с учетом ее поворота на 90° , но распределение интенсивности остается слегка неоднородным.

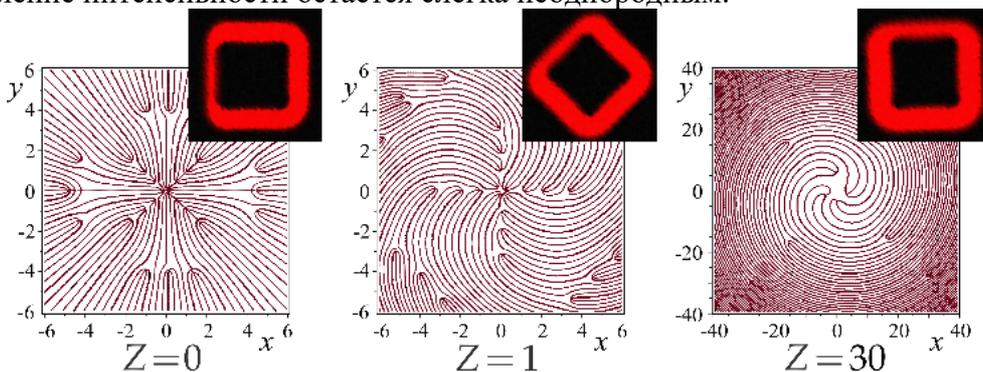


Рис. 2. Экспериментальные распределения интенсивности и компьютерное моделирование фазовой картины для $a=2,65$ и различных Z

Результаты и заключение

Таким образом, мы проанализировали процесс перестройки структуры четырехугольного СВ пучка, вызванный действием непрозрачного экрана. В данном случае совместно с экспериментом применялись методы компьютерного моделирования с учетом дальней зоны дифракции СВ пучка. Установлено, что возмущение в виде экранирования части пучка, не влияющее на область максимума, позволяет СВ пучку частично восстановить свою первоначальную форму.

Литература

- [1] Forbes A., de Oliveira M., Dennis M.R. Structured light //Nature Photonics. – 2021. – V. 15. – Is. 4. – P. 253-262.
- [2] Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. Spiral light beams //Physics-Uspekhi. – 2004. – V. 47. – Is. 12. – P. 1177-1203.
- [3] Razueva E., Abramochkin E. Multiple-twisted spiral beams //JOSA A. – 2019. – V. 36. – Is. 6. – P. 1089-1097.
- [4] Rodrigo J.A., Alieva T., Abramochkin E., Castro, I. Shaping of light beams along curves in three dimensions //Optics express. – 2013. – V. 21. – Is. 18. – P. 20544-20555.

УДК 535.421

**БЫСТРЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ОУМ ПРИ ВНУТРЕННИХ ВОЗБУЖДЕНИЯХ
СТРУКТУРИРОВАННОГО ПУЧКА, АСТИГМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
И ИХ ИНВАРИАНТЫ**

Александр Владимирович Воляр*, Евгений Григорьевич Абрамочкин, Михаил Владимирович
Брецько*, Яна Евгеньевна Акимова*, Юрий Александрович Егоров***

**Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

***Самарский филиал Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия*

Аннотация

В данной работе мы рассматриваем в теоретическом и экспериментальном плане результаты возбуждения в каждой моде Эрмита-Гаусса кратных гармоник в зависимости от амплитудных и фазовых параметров пучка, и проследим за результатом такого возбуждения. При этом основное внимание фокусируется на изменениях ОУМ, астигматичных преобразованиях структурированных пучков Лагерра-Гаусса, и на инвариантах гармонических возбуждений

Ключевые слова

Топологический заряд, структурная устойчивость, спиральный пучок, спектр вихрей

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 20–37–90066, № 19–29–01233, № 20–37–90068) и Совета министров Республики Крым (№ 20–47–910002)

**FAST OAM OSCILLATIONS UNDER INTERNAL EXCITATIONS OF A
STRUCTURED BEAM, ASTIGMATIC TRANSFORMATIONS AND THEIR
INVARIANTS**

Alexander V. Volyar, Evgeny G. Abramochkin, Mikhail V. Bretsko, Yana E. Akimova, Yuriy A. Egorov

**V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

***Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia*

Abstract

In this paper, we consider in theoretical and experimental terms the result of excitation of multiple harmonics in each Hermite-Gauss mode depending on the amplitude and phase parameters of the beam, and we will follow the result of such excitation. In this case, the main attention is focused on changes in the OAM, astigmatic transformations of structured Laguerre-Gauss beams, and on the invariants of harmonic excitations

Keywords

Topological charge, structural stability, spiral beam, vortex spectrum

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (No. 20-37-90066, No. 19-29-01233, No. 20-37-90068) and the Council of Ministers of the Republic of Crimea (No. 20-47-910002)

Используемые методы и подходы

Широкое использование семейства лазерных пучков со многими степенями свободы, получивших название структурированных вихревых пучков, предполагают возбуждение в каждом вихревом канале больших массивов данных [1]. Каждая степень свободы структурированного пучка может ассоциироваться с орбитальным (ОАМ) или спиновым угловым моментом или же с собственными модами пучка (например, модами Лагерра-Гаусса (LG), Эрмита-Гаусса (HG), Айнса-Гаусса (IG) и т. д.). Одним из представителей данного семейства являются структурированные пучки Лагерра-Гаусса (sLG), содержащие множество HG мод [2]. Рассматриваем в теоретическом и экспериментальном плане результат возбуждения в каждой HG моде кратных гармоник, характеризующихся

множителем $\varepsilon_k = (1 + \varepsilon \exp(ik\theta))$, где ε и θ - амплитудный и фазовый параметр, соответственно, что позволяет проследить за результатом такого возбуждения. При этом основное внимание фокусируется на изменениях ОАМ при астигматичном преобразовании sLG и на инвариантах гармонических возбуждений и астигматических преобразований. Было показано, что изменения амплитудного параметра ε приводит к разделению sLG пучков на два больших семейства пучков. Первое семейство при $\varepsilon = 1$ представляет совокупность двух стандартных мод – LG моды и гибридной моды Эрмита-Лагерра-Гаусса (HLG) [3], второе семейство при $\varepsilon \gg 1$ характеризуется только гибридной HLG модой. Вариация фазового параметра приводит изменению амплитудной и фазовой структуры от вихревых LG мод до свободных от вихрей HG мод. В семействе sLG пучков с $\varepsilon = 1$ можно выделить состояние с фазовым параметром $\theta = \pi/2$, состоящее из суперпозиции LG и HG моды, и с $\theta = \pi$, представленное вырожденной LG модой, состоящей из двух LG мод с противоположными знаками топологических зарядов (ТЗ) вихрей. В семействе sLG пучков с $\varepsilon \gg 1$ также выделяются два состояния: 1) при $\theta = \pi/2$ формируется HG мода, 2) при $\theta = \pi$ формируется LG мода с противоположным знаком ТС.

Гармонические возбуждения HG мод приводит к возникновению широкого спектра LG мод, с комплексными амплитудами и перепутыванием радиальных и азимутальных (ТС) чисел LG мод. Именно такое перепутывание квантовых чисел и приводит к быстрым осцилляциям ОАМ. Стоит только приравнять нулю начальное радиальное число sLG мод $n = 0$, как быстрые осцилляции исчезают. Заметим, что sLG пучок содержит $N = 2n + \ell$ мод с ТЗ в интервале от $TC = 2n + \ell$ до $TC = -(2n + \ell)$. Например, sLG пучок с $n = 8$, $\ell = 8$ содержит 24 LG моды с различными знаками ТС. ОАМ, как функция фазового параметра θ , не изменяет знак до тех пор, пока общий ТС структурированного пучка остается численно равным максимальному значению при нулевом фазовом параметре. С другой стороны, ТС одновременно с ОАМ изменяет знак, но его абсолютная величина является постоянной во всем интервале фазовых параметров. Таким образом, модуль ТС является топологическим инвариантом гармонического возбуждения структурированного LG пучка. Не менее интересными и важными являются астигматические преобразования sLG пучка в двойном фокусе цилиндрической линзы. Так, состояние $sLG_4^4(\varepsilon = 1, \theta = \pi)$ (вырожденная LG мода) преобразуется в две скрещенных HG моды. Структура sLG пучка кардинально изменяется. Однако состояния $sLG_4^4(\varepsilon = 1, \theta = \pi/2)$ и состояния $sLG_4^4(\varepsilon = 1, \theta = 3\pi/2)$ остаются инвариантными при астигматических преобразованиях с точностью до углового поворота. Это происходит потому, что эти состояния состоят из суперпозиции двух мод типа LG+HG. Астигматическая линза осуществляет преобразование LG моды в HG моду, а HG моды в LG моду, так что распределение интенсивности просто поворачивается на $\pi/2$. Аналогично, состояние $sLG_4^4(\varepsilon \gg 1, \theta = \pi)$ также остается инвариантным относительно астигматического преобразования с точностью до изменения знака ТС оптических вихрей.

Квадраты модовых амплитуд можно трактовать как условную вероятность обнаружения пучка sLG в состоянии $(n, \ell, \varepsilon, \theta)$, при условии, что в каждой HG моде возбуждается кратная фаза $k\theta$. Наличие большого количества новых модовых состояний в пучке sLG означает увеличение неопределенности для нахождения пучка в каком-то конкретном состоянии LG-моды. Численный расчёт этой неопределенности или меры информационного беспорядка задается энтропией Шеннона [4]:

$$H(\varepsilon, \theta) = - \sum_{k=0}^{2n+\ell} |\bar{c}_k(\varepsilon, \theta)|^2 \log_2 |\bar{c}_k(\varepsilon, \theta)|^2 \text{ bit}. \quad (1)$$

Для определения информационной емкости $H(\varepsilon, \theta)$ пучка sLG необходимо подставить квадрат модуля амплитуды моды HG в выражение (1). Из-за ортогональности мод HG перекрестные помехи между каналами отсутствуют, и информационная емкость пучка имеет ненулевое значение при $\theta = 0$, что указывает на большое количество каналов в виде мод HG. При изменении фазового параметра происходят осцилляции энтропии, а при $\theta = \pi$ наблюдается резкое падение, что свидетельствует об уменьшении числа полезных каналов. Если же представить поле sLG пучка в виде разложения по базису мод LG, то в таком случае энтропия Шеннона поменяет свой вид. при $\theta = 0$ оно будет иметь нулевое значение, а при $\theta = \pi/2$ максимальное значение, что свидетельствует о появлении в пучке дополнительных степеней свободы в виде мод LG.

Результаты и заключение

Было показано, что изменения амплитудного параметра ε приводят к разделению sLG пучков на два больших семейства пучков. Первое семейство (при условии $\varepsilon = 1$) представляет совокупность двух стандартных мод – LG моды и гибридной моды Эрмита-Лагерра-Гаусса, второе семейство (при условии $\varepsilon \gg 1$) характеризуется только гибридной HLG модой. Вариация фазового параметра приводит изменению амплитудной и фазовой структуры от вихревых LG мод до свободных от вихрей HG мод.

Различие трактовки информационной энтропии как меры неопределенности и меры информационной емкости рассмотрено на примере измерения энтропии Шеннона в базисах мод LG и HG. Стоит отметить, что для сортировки мод из структурированного пучка всегда следует использовать базы мод HG, так как в базисах мод LG имеются всегда быстрые колебания ОАМ, и в общем случае при передачи больших данных будут наблюдаться хаотические колебания. Используя правила управляемого хаоса, измерения в базисе мод LG можно использовать как дополнительный канал передачи данных. Представленный нами подход двухпараметрического возбуждения может быть использован и для других семейств структурированных пучков, в частности, для LG-пучков комплексного аргумента для IG-подобных пучков.

Литература

- [1] Forbes A., de Oliveira M., Dennis M.R. Structured light //Nature Photonics. – 2021. – V. 15. – Is. 4. – P. 253-262.
- [2] Volyar A. et al. Fine structure of perturbed Laguerre–Gaussian beams: Hermite–Gaussian mode spectra and topological charge //Applied Optics. – 2020. – V. 59. – Is. 25. – P. 7680-7687.
- [3] Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. Spiral light beams //Physics-Uspekhi. – 2004. – V. 47. – Is. 12. – P. 1177-1203.
- [4] Shannon C.E. A mathematical theory of communication //The Bell system technical journal. – 1948. – V. 27. – Is. 3. – P. 379-423.

УДК 535.3

ГЕНЕРАЦИЯ БЕССЕЛЕВЫХ ПУЧКОВ В ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОМ СВЕТЕ

Юрий Александрович Егоров, Михаил Владимирович Брецько, Яна Евгеньевна Акимова,
Александр Владимирович Воляр, Александр Федорович Рыбась, Сервер Искандарович Халилов

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

Аннотация

В данном научном исследовании нами будет показана возможность формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса как нулевого, так и первого порядков, при помощи широкодиапазонных некогерентных источников света, а доказательством создания таких типов пучков послужат интерференционные картины

Ключевые слова

Полихроматический пучок Бесселя, топологический заряд, топологический квадруполь

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№20–37–90066, №19–29–01233, №20–37–90068) и Совета министров Республики Крым (№ 20–47–910002)

GENERATION OF BESSEL BEAMS IN POLYCHROMATIC LIGHT

Yuriy A. Egorov, Mikhail V. Bretsko, Yana E. Akimova, Alexander V. Volyar, Alexander F. Rubass,
Server I. Halilov

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Abstract

In this scientific study, we will show the possibility of forming polychromatic Bessel-Gauss beams of both zero and first orders using incoherent light sources, and interference patterns will serve as proof of the creation of such types of beams

Keywords

Polychromatic Bessel beam, topological charge, topological quadrupole

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (No. 20-37-90066, No. 19-29-01233, No. 20-37-90068) and the Council of Ministers of the Republic of Crimea (No. 20-47-910002)

Введение

Как хорошо известно, когерентность оптического волнового фронта играет ключевую роль в формировании инвариантных световых полей Лагерра-Гаусса, Эрмита-Гаусса и Бесселя-Гаусса и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы, и т.п. Если мы будем рассматривать оптическое излучение как суперпозицию конических волн, то сразу становится ясно, что когерентность то базовое свойство, которое играет ключевую роль в формировании таких типов пучков. В данной работе мы на примере пучков Бесселя-Гаусса покажем, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). Используя данный тип источников излучения, мы поясним, каким образом сформированные пучки зависят от функции ширины спектра.

Используемые методы и подходы

Из канонических учебников [1] нам хорошо известно, что характерной волновой характеристикой является дифракция света, которая возникает, если источник излучения

является точечным и промодулирован по фазе или амплитуде, что приводит к интерференции волнового фронта с последующим возникновением дифракционных порядков. Дифракция, с точки зрения квантовой механики связана напрямую с представлением де Бройля о частице и принципом неопределенности Гейзенберга и, самое главное, связана напрямую с длиной волны, которая обратно пропорциональна моменту частицы. Именно с этой точки зрения решения уравнения Гельмгольца являются инвариантами и так называемые псевдо-недифрагирующие пучки получили значительный интерес к изучению.

В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьёзнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемтосекундного, так и для непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса, что, в конечном счете, позволяет нам положительно оценивать свойства таких пучков с учетом пространственной и временной когерентности поля.

Основной характеристикой при формировании пучков Бесселя-Гаусса или других недифрагирующих пучков, является соблюдение требований, связанных с пространственной когерентностью источника оптического излучения [3]. Нами было сформировано недифрагирующее световое распределение поля, которое обладало пространственной когерентностью, но при этом временная когерентность полностью отсутствовала.

Для формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса была создана экспериментальная установка. Свет от источника оптического излучения при помощи зеркально-линзового конденсора и ахроматического микрообъектива фокусировался на входной торец оптического волокна с диаметром сердцевины 7,5 мкм и диаметром оболочки 27,5 мкм.

Как показали наши исследования, использование оптического волокна крайне необходимо в связи с тем, что источник полихроматического света не является когерентным. Для создания такого источника излучения с пространственной когерентностью нами были проанализированы и проверены различные виды оптических волокон с сердцевиной от 5 до 100 мкм. Как оказалось если волокно имеет большой диаметр сердцевины, то интенсивность излучения торца волокна достаточная для формирования пучка Бесселя, но сама картина является размытой вследствие малой длины когерентности. С другой стороны. Если мы используем оптическое волокно с малым диаметром, то в этом случае мы можем наблюдать высококонтрастный пучок Бесселя. Но в данном случае интенсивность сформированной картины не позволяет нам зафиксировать требуемое нам изображение.

После прохождения излучения через оптическое волокно мы формировали коллимированный пучок диаметром 5мм, с помощью ахроматического микрообъектива. В последствии коллимированный пучок направлялся на аксикон - коническую линзу. Фокальную зону, сформированную конической линзой, мы проецировали ахроматическим микрообъективом на CMOS камеру.

Анализ интерференционной картины, сформированной бипризмой Френеля указывает на то, что на оси в центре пучка гладкий волновой фронт, а вблизи оси наблюдаются регулярные интерференционные полосы. Нами показано, что интерференционные полосы имеют нерегулярную структуру, и их искажение формирует «вилочную» структуру. Следует отметить, что «вилки» в классической интерференционной картине являются структурами, которые получили название –оптические вихри и

соответствуют точкам волнового фронта, где амплитуда обращается в ноль, а фаза не определена [4–6].

Наличие вилок в пучке Бесселя-Гаусса нулевого порядка характеризуется топологическим квадруполем. Ориентация «вилки» характеризует знак топологического заряда оптического вихря, а именно нижние и верхние «вилки» одинаковы, но соответствуют разным топологическим зарядам

Нами были проведены сравнения оптических свойств недифрагирующих полей при использовании различных типов световых источников. В данном исследовании нами было показано, что существует возможность создания полихроматических пучков Бесселя не только нулевого, но и второго порядков.

В результате распространения недифрагирующего пучка Бесселя через систему поляризатор – кристалл – поляризатор [7, 8] на оси пучка было сформировано изображение с минимумом интенсивности, что соответствует оптическому вихрю.

При детальном изучении сформированной интерференционной картины, на оси пучка сформирована цветная «вилка», которая полностью совпадает с расположением минимума интенсивности пучка Бесселя-Гаусса первого порядка. Данный факт свидетельствует о том, что наши предварительные предположения о наличии оптического вихря на оси полихроматического пучка Бесселя-Гаусса первого порядка, полностью подтвердилось.

Результаты и заключение

В данной работе на примере пучков Бесселя-Гаусса показано, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьезнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемтосекундного, так и для непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса нулевого и первого порядков и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы и др.

Литература

- [1] Nye J.F., et. al. Natural Focusing and Fine Structure of Light. Caustics and Wave Dislocations // Institute of Physics Publishing. 1999. P. 327.
- [2] Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. – Радио и связь, 1987. 656 с.
- [3] Fischer P. et. al. White light propagation invariant beams //Optics Express. – 2005. – V. 13. – Is. 17. – P. 6657.
- [4] Soifer V.A.,et. al. Laser beam mode selection by computer-generated holograms // CRC Press. 1994. 224 p.
- [5] Kotlyar V.V. Vortex Laser Beams // CRC Press. 2018. 404 p.
- [6] Basistiy I.V., Soskin M.S., Vasnetsov M.V. Optical wavefront dislocations and their properties //Optics Communications. – 1995. – V. 119. – Is. 5-6. – P. 604-612.
- [7] Volyar A.V., Fadeeva T.A., Egorov Y.A. Vector singularities of Gaussian beams in uniaxial crystals: optical vortex generation //Technical physics letters. – 2002. – V. 28. – Is. 11. – P. 958-961.
- [8] Volyar A.V. et al. Fine structure of “white” optical vortices in crystals //Technical physics letters. – 2004. – V. 30. – V. 8. – P. 701-704.

УДК 535.012.21+535-47

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭПЮР ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ШЕРОХОВАТОСТИ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Александр Петрович Владимиров, Константин Вячеславович Наумов

Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

Объектом исследования был образец из стали 09Г2С, испытываемый на многоцикловую усталость в условиях от нулевого нагружения. Целью исследования было построение эпюр пластических деформаций, соответствующих разным стадиям зарождения трещины. Деформационные перемещения на лицевой, шероховатой поверхности определяли методом усредненных во времени спекловых изображений. На тыльной, первоначально полированной поверхности интерференционным микроскопом определяли шероховатость до и после испытания на усталость. Рассмотрены зависимости наиболее опасных растягивающих относительных перемещений точек поверхности от числа циклов в зоне зарождения трещины.

Ключевые слова

Многоцикловая усталость, металл, пластическая деформация, разрушение, спеклы, интерференция, изображение

Благодарности

Работа поведена при частичной поддержке Уральского Федерального Университета, акт 211 правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006

THE USE OF OPTICAL METHODS FOR RECORDING DIAGRAMS OF PLASTIC DEFORMATIONS AND ROUGHNESS AT DIFFERENT STAGES OF MULTI-CYCLE FATIGUE

Alexander P. Vladimirov, Konstantin V. Naumov

Institute of Engineering Science UB RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract

The object of the study was a sample made of steel 09G2S, tested for high-cycle fatigue under from-zero loading conditions. The aim of the study was to construct diagrams of plastic deformations corresponding to different stages of crack nucleation. Deformation displacements on the front, rough surface was determined by the method of time-averaged speckle images. On the back, initially polished surface, the roughness was determined by an interference microscope before and after the fatigue test. The dependences of the most dangerous stretching relative displacements of surface points on the number of cycles in the crack nucleation zone are considered.

Keywords

Speckle, high-cycle fatigue, metal, plastic deformation, fracture, image

Acknowledgements

The work was carried out with the partial support of the Ural Federal University, Act 211 of the Government of the Russian Federation, Agreement No. 02.A03.21.0006

Введение

При освещении когерентным светом шероховатой поверхности в плоскости изображения объекта образуется пятнистая или спекловая структура рассеянного излучения. Ранее в [1] было показано, что при многоцикловой усталости предельная локальная растягивающая деформация, соответствующая зарождению трещины, на базе порядка 10 мкм имеет значение порядка 10^{-1} . Однако не было ясно, как распределена указанная пластическая деформация по поверхности образца, а затем и вблизи трещины при разных циклах нагружения. Получение таких данных актуально как для создания физических моделей многоцикловой усталости, так и для разработки методов численного

расчета напряженно-деформированного состояния объектов, эксплуатируемых в условиях много - цикловой усталости. Поскольку в зависимости от способа разбиения тела на конечные элементы можно получить значительно различающиеся результаты, то полученные данные способствовали бы выбору оптимального способа разбиения. Целью исследования было построение эпюр пластических деформаций в разных частях объекта на разных стадиях зарождения усталостной трещины.

Теория

Кратко изложена теория метода усредненных во времени спекловых изображений. Приведена формула, связывающая относительные перемещения точек поверхности и порядки интерференции в точке наблюдения.

Эксперименты

Объектом исследования был плоский образец стали 09Г2С с двумя симметричными выточками радиусом 2,5 мм. Образец подвергали циклическому деформированию с частотой около 100 Hz, коэффициент асимметрии цикла равнялся 0,1. Рабочую часть образца освещали лазерным модулем с длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм, на одном кадре телекамеры под двумя ракурсами наблюдения формировали два спекловых изображения образца. Путем решения двух линейных уравнений с двумя неизвестными, для разных циклов N определяли компоненты Δu_y и Δu_z вектора $\Delta \vec{u}$ относительных перемещений точек поверхности, расположенных на расстоянии порядка 10 мкм. Проведен анализ зависимостей $\Delta u_y(N)$ и $\Delta u_z(N)$ для разных участков поверхности, а также эпюр $\Delta u_y(x)$, $\Delta u_y(y)$ и $\Delta u_z(x)$, $\Delta u_z(y)$ для разных циклов периодического деформирования в зоне зарождения трещины и в центре образца. Трещина длиной порядка 100 мкм образовалась на вершине одного из вырезов. В конце опыта зависимости $\Delta u_y(y)$ и $R_a(y)$ имеют колоколообразный вид, пиковые их значения сдвинуты на 450 мкм. Для детального изучения явлений, возникающих при многоциклового усталости, необходимо изучить эволюцию упругих деформаций в процессе локализации необратимых процессов.

Заключение

На поверхности образца имеются области монотонного изменения растягивающих деформаций, а также области, в которых присутствуют участки растяжения и сжатия. Показано, что на месте зарождения трещины и в центре образца предельные значения растягивающих деформаций достигают величины порядка 10^{-1} , однако в центре они имеют меньшее значение. Для создания адекватных моделей многоциклового усталости материалов информацию о распределении пластических деформаций следует дополнить данными по динамике упругих деформаций в процессе локализации необратимых процессов.

Литература

[1] Iadimirov A.P., Drukarenko N.A., Myznov K.E. Using Speckle Images for Determining the Local Plastic Strains Arising at High-Cycle Fatigue of 09G2S Steel //Technical Physics Letters. – 2021. – V. 47. – Is. 8. – P. 773–776.

УДК 535.343.3

ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$

Валерия Георгиевна Дю, Марина Григорьевна Кистенёва, Сергей Алексеевич Вдовенко, Алексей Петрович Жулин, Станислав Михайлович Шандаров, Юрий Федорович Каргин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Аннотация

Исследованы изменения в спектральных зависимостях оптического поглощения, наведенные в легированном кальцием и галлием кристалле титаната висмута в результате последовательной засветки непрерывным лазерным излучением, вначале с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм, а затем более длинноволновым, с $\lambda_n = 588, 655, 700$ нм. Получено, что после коротковолновой засветки с $\lambda_i = 532$ нм оптическое поглощение кристалла увеличивается в диапазоне 415–900 нм. Последующая экспозиция более длинноволновым излучением приводит к просветлению кристалла в данной спектральной области. Величина наведенных изменений в оптическом поглощении зависит от длины волны просветляющего излучения

Ключевые слова

Фотоиндуцированное поглощение, спектры оптического поглощения, силлениты, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020–0038/3 на 2020–2022 годы

PHOTOINDUCED ABSORPTION IN $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ CRYSTAL

Stanislav M. Shandarov, Valeriya G. Dyu, Marina G. Kisteneva, Sergey A. Vdovenko, Aleksey P. Zhulin, Yurii F. Kargin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract

Changes in the spectral dependences of the optical absorption induced in the bismuth titanium oxide crystal doped by calcium and gallium as a result of sequential exposition to cw laser radiation first with the wavelength $\lambda_i = 532$ nm and then with the longer wavelength $\lambda_n = 588, 655, 700$ nm are investigated. Our experiments show that after the short-wavelength exposition to radiation with $\lambda_i = 532$ nm, the optical absorption in the crystal increases in the range of 415–900 nm. The subsequent exposition to longer-wavelength radiation leads to enhanced transmittance of the crystal in the examined spectral range. The magnitude of the induced changes in optical absorption depends on the wavelength of clarified radiation

Keywords

Photoinduced absorption, optical absorption spectrum, sillenites, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

Acknowledgements

Financial support from Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the State Assignment FEWM-2020-0038/3 for 2020-2022 is gratefully acknowledged

Введение

При использовании фоторефрактивных кристаллов силленитов в качестве светочувствительной среды в устройствах динамической голографии [1, 2], необходимо принимать во внимание наличие у них фотохромных свойств, связанных с дефектными центрами, энергетические уровни которых локализованы в запрещенной зоне. В то же время примеси могут оказывать значительное влияние на фоторефрактивные параметры силленитов [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований фотоиндуцированного поглощения, наведенного в легированном кальцием и галлием кристалле титаната висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ в результате последовательной засветки

непрерывным лазерным излучением, вначале с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм, а затем более длинноволновым, с $\lambda_n = 588, 655, 700$ нм.

Экспериментальные результаты

В экспериментах исследовался образец $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca, Ga}$, имеющий толщину 8,75 мм вдоль кристаллографического направления [100]. Спектры пропускания кристалла регистрировались как до, так и после каждой засветки непрерывным лазерным излучением. Облучение кристалла осуществлялось до насыщения в спектрах поглощения.

Экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca, Ga}$, полученных в результате последовательной засветки непрерывным лазерным излучением, вначале с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм, а затем с длиной волны $\lambda_n = 655$ нм, представлены на рисунке а. Получено, что экспозиция светом с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм и интенсивностью $I_i = 36$ мВт/см² на входной грани кристалла в течение 2400 с, используемая на первом этапе, каждый раз приводила его к неизменной форме (красная кривая на рисунке), с максимальными наблюдаемыми значениями $k(\lambda)$. Облучение образца на последующем этапе осуществлялось до насыщения в спектре оптического поглощения $k(\lambda)$ излучением с $\lambda_n = 655$ нм ($I_n = 26$ мВт/см², в течение 1800 с; зеленая кривая на рисунке а) и приводило к его просветлению во всем диапазоне от 415 до 900 нм.

На рисунке б представлены спектральные зависимости изменения оптического поглощения $\Delta k(\lambda)$ при просветлении кристалла $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca, Ga}$, предварительно экспонированного зеленым светом ($\lambda_i = 532$ нм), достигаемого его последующей засветкой более длинноволновым излучением с $\lambda_n = 588$ ($I_n = 0,07$ мВт/см², в течение 3600 с; красная кривая), 655 (синяя кривая) и 700 нм ($I_n = 0,1$ мВт/см², в течение 7200 с; зеленая кривая).

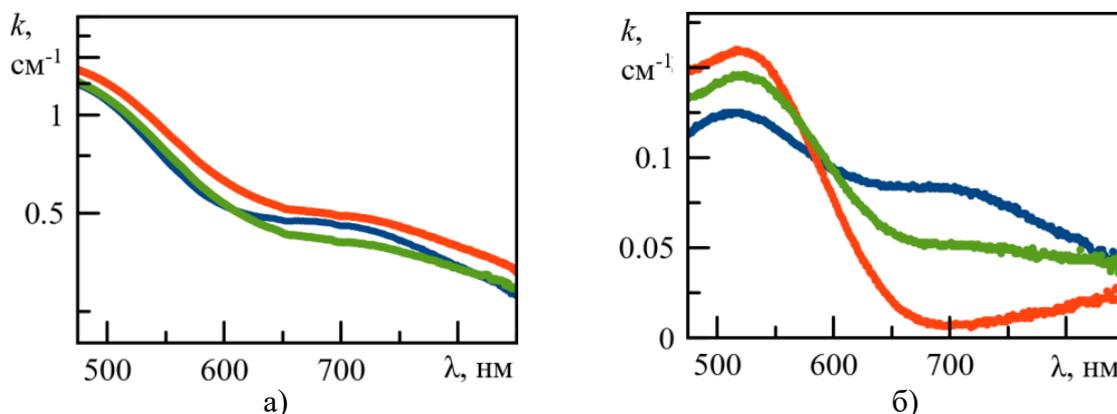


Рисунок. Спектральные (а) зависимости оптического поглощения в кристалле $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca, Ga}$ в исходном состоянии (синяя) и после лазерной засветки вначале с длиной волны 532 нм (красная), а затем с длиной волны 655 нм (зелёная) и (б) оптического просветления в кристалле, предварительно облучённого зелёным светом, наблюдаемые после насыщающей засветки на длинах волн 588 (красная), 655 (синяя) и 700 нм (зелёная)

Как видно из рисунка б, экспозиция кристалла $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca, Ga}$ более длинноволновым излучением с $\lambda_n = 655$ и 700 нм после облучения светом с $\lambda_i = 532$ нм приводит к его просветлению во всем исследованном диапазоне от 415 до 900 нм. Облучение образца длинноволновым излучением с $\lambda_n = 588$ нм приводит к максимальному просветлению в диапазоне от 415 до 600 нм, но практически не приводит к изменению оптического поглощения в диапазоне 650–800 нм.

Заключение

Таким образом, облучение кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ непрерывным лазерным излучением с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм приводит к максимальным значениям оптического поглощения в диапазоне 415–900 нм со спектральной зависимостью $k(\lambda)$, не зависящей от его исходного состояния. Последующая засветка более длинноволновым лазерным излучением с длинами волн $\lambda_n = 588, 655$ и 700 нм приводит к его просветлению с насыщением при экспозициях, зависящих от используемой длины волны. Величина наведенных изменений зависит от длины волны длинноволнового излучения.

Литература

- [1] Шандаров С.М., Кистенева М.Г., Дю В.Г., Худякова Е.С., Каргин Ю.Ф., Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в легированном алюминием кристалле титаната висмута при последовательной засветке коротковолновым и длинноволновым излучением //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – №. 11-3. – С. 95-97.
- [2] Marinova V., Huei Lin S., Chung Liu, R., Hsu K.Y. Photorefractive Effect: Principles, Materials, and Near-Infrared Holography //Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. – 1999. – P. 1-20.
- [3] Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марьин А.А., Егорышева А.В., Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{MxO}_{20+\delta}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства. – М: Изд-во ИОНХ РАН, 2004. – 316 с.

УДК 535.41

**ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ВРЕМЕННОГО И УГЛОВОГО СПЕКТРОВ
ОСВЕЩАЮЩЕГО ПОЛЯ НА ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТА
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПРОДОЛЬНОГО
СМЕЩЕНИЯ МИКРООБЪЕКТИВА В РАВНОПЛЕЧНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ
ЛИННИКА**

Дарья Михайловна Клычкова

СГУ имени Чернышевского Н.Г., г. Саратов, Россия

Аннотация

Работа посвящена исследованию влияния ширины временного и углового спектров освещающего поля на зависимость контраста интерференционной картины от величины продольного смещения микрообъектива в равноплечном интерферометре Линника. Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость контраста интерференционной картины от величины продольного смещения микрообъектива при различных значениях ширины временного и углового спектров. Показано, что с ростом величины продольного смещения одного из микрообъективов из положения фокуса наблюдается снижение контраста интерференционной картины, что представляет собой проявление продольной пространственной когерентности опорного и объектного полей

Ключевые слова

Интерферометр Линника, продольная пространственная когерентность, угловой спектр, временной спектр, дефокусировка

**INFLUENCE OF THE TEMPORAL AND ANGULAR SPECTRA WIDTH OF THE
ILLUMINATION FIELD ON THE INTERFERENCE PATTERN CONTRAST
DEPENDENCE ON THE LONGITUDINAL DISPLACEMENT VALUE OF THE
MICROOBJECTIVE IN AN EQUAL-ARM LINNIK INTERFEROMETER**

Daria M. Klychkova

Saratov Chernyshevsky State University, Saratov, Russia

Abstract

The work is devoted to the study of the influence of the temporal and angular spectra width of the illumination field on the interference pattern contrast dependence on the longitudinal displacement value of the microobjective in the equal-arm Linnik interferometer. An analytical expression is obtained that describes the interference pattern contrast dependence on the longitudinal displacement value of the microobjective for various temporal and angular spectra widths. It is shown that with an increase in the longitudinal displacement of one of the microobjectives from the focus position, a decrease in the interference pattern contrast is observed, which is a manifestation of the longitudinal spatial coherence of the reference and object fields

Keywords

Linnik interferometer, longitudinal spatial coherence, angular spectrum, time spectrum, defocusing

Введение

Обычно длину продольной когерентности поля рассматривают как длину временной когерентности. В [1] при помощи неравноплечного интерферометра Майкельсона, показано, что длина продольной когерентности определяется не только временным, но и угловым спектром поля, в отличие от длины временной когерентности. При исследовании эффектов продольной пространственной когерентности полей обычно используется интерферометр Майкельсона или интерферометр Линника. Смещение поля, необходимое для определения длины продольной когерентности, обычно реализуется при помощи смещения зеркала в одном из плеч интерферометра. Если исследуемое поле имеет широкий

временной спектр, то смещение зеркала может вызвать затруднения в определении влияния углового спектра на длину продольной когерентности: если смещение зеркала вызовет смещение поля большее, чем длина временной когерентности, то контраст интерференционной картины будет стремиться к нулю, и влияние углового спектра установить не удастся. Поэтому для исследования влияния углового спектра на длину продольной когерентности необходимо, чтобы смещение поля было меньше длины временной когерентности.

В интерферометре Линника продольное смещение поля можно реализовать и при равенстве оптических длин плеч – при помощи продольного смещения одного из микрообъективов из положения фокуса. Такой подход позволяет исследовать влияние характеристик временного и углового спектров без временной декогерентности.

Данная работа посвящена исследованию влияния ширины временного и углового спектров на зависимость контраста интерференционной картины от продольного смещения микрообъектива в равноплечном интерферометре Линника.

Используемая модель

Аналитическое выражение, описывающее зависимость контраста интерференционной картины от продольного смещения одного из микрообъективов из положения фокуса в равноплечном интерферометре Линника при различных значениях ширины временного и углового спектров, получено на основании теоретической модели формирования сигнала в интерференционной микроскопии, предложенной в [2]. Данная модель построена с использованием методов дифракционного анализа (интеграл Френеля-Кирхгофа и представление углового спектра волнового поля) в параболическом приближении и представления микрообъективов и линз как тонких фазовых модуляторов. Несмотря на параболическое приближение, данная модель может применяться для анализа микроскопов с большими числовыми апертурами при условии коррекции aberrаций [2].

При выводе аналитического выражения предполагалось, что освещающее поле в плоскостях апертур микрообъективов пространственно некогерентно.

Результаты и заключение

На основе полученного выражения выполнено численное моделирование зависимостей контраста интерференционной картины от продольного смещения одного из микрообъективов из положения фокуса в равноплечном интерферометре Линника при различных значениях ширины временного и углового спектров. Причем, чем шире угловой спектр поля освещения, тем быстрее снижается контраст. Влияние ширины временного спектра на полученные зависимости проявляется в значительно меньшей степени.

Данный эффект представляет собой проявление продольной пространственной когерентности опорного и объектного полей, определяемой характеристиками временного и углового спектров освещающего поля.

Литература

- [1] Рябухо В.П., Лякин Д.В., Лычагов В.В. Продольная когерентность оптического поля протяженного пространственно некогерентного источника // Компьютерная оптика. 2009. – Т. 33. – № 2. – С. 175–184.
- [2] Гребенюк А.А. Формирование сигнала и свойства визуализации в интерференционной микроскопии. Кандидатская диссертация. – СГУ, 2014.

УДК 535.4

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Алексей Сергеевич Езерский, Константин Андреевич Герасимов

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В работе производилось измерение глубины канавок фазового калибровочного слайда при помощи цифровой голографии. Осуществлен анализ фазовых изображений, получаемых при помощи голографической системы регистрации, основанной на эффекте геометрической фазы и использовании поляризационной камеры. В ходе эксперимента были получены голограммы фазового калибровочного слайда, из которых были восстановлены фазовые изображения методом 4-шагового параллельного фазового сдвига и вычитанием волнового фронта без объекта. Было установлено, что метод позволяет измерять вносимую фазовым микрообъектом разность фаз с высокой точностью

Ключевые слова

Цифровая голографическая микроскопия, голография, фазовое изображение, поляризационная камера, геометрическая фазовая линза

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации No. MD-6101.2021.1.2

ANALYSIS OF THE PHASE IMAGES OBTAINED DURING THE COLLECTION OF A HOLOGRAPHIC REGISTRATION SYSTEM BASED ON THE GEOMETRIC PHASE EFFECT AND A POLARIZATION CAMERA

Aleksei S. Ezerskii, Konstantin A. Gerasimov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

In this work, the depth of the grooves of the quantitative phase calibration target were measured using digital holography. An analysis was made of phase images obtained using a holographic registration system based on the geometric phase effect and using a polarizing camera. During the experiment, holograms of the quantitative phase calibration target were obtained, from which the phase images were restored using the 4-step parallel phase shift method and by subtracting phase of the wavefront without an object. It was found that the method makes it possible to measure the phase difference introduced by the phase object with high accuracy

Keywords

Digital holographic microscopy, holography, phase imaging, polarizing camera, geometric phase lens

Acknowledgements

This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MD-6101.2021.1.2

Введение

Цифровая голография фазового сдвига позволяет восстанавливать волновой фронт путем регистрации нескольких интерферограмм с различным сдвигом по фазе. В таких системах могут использоваться элементы с эффектом геометрической фазы [1], которые позволяют разделить проходящее излучение на 2 пучка, при этом внося фазовую задержку и изменяя поляризацию. Также, использование поляризационной камеры, в которой массив микрополяризаторов с различными углами поляризации сопряжен с массивом пикселей камеры, позволяет использовать низкокогерентные источники излучения для записи цифровых голограмм, благодаря регистрации 4 различных распределений интенсивности

за одну экспозицию. Помимо этого, использование одноплечевой интерференционной схемы делает её устойчивой к внешним механическим вибрациям.

Описание схемы установки и используемых методов

Экспериментальная установка представляет собой осевую голографическую схему записи, основанную на эффекте геометрической фазовой линзы. Излучение полупроводникового лазерного источника длиной волны 532 нм приобретает линейную поляризацию, проходя через призму Глана-Тейлора и освещает исследуемый объект. Далее световой пучок расширяется при помощи микрообъектива и проходит через дифракционную линзу с эффектом геометрической фазы, за счёт которого линейно поляризованный волновой фронт разделяется на 2 пучка – сходящийся и расходящийся с левой и правой круговой поляризацией, соответственно, результат интерференции которых регистрируется при помощи поляризационного матричного фотодетектора. Для восстановления распределения комплексного интерференционного поля, интенсивность которого регистрируется на матричном фотоприёмнике, используется алгоритм четырехшагового параллельного фазового сдвига [2]. Фазовое изображение объекта восстанавливается при помощи вычитания фазы волнового фронта без объекта. Определение глубины канавок фазового объект-микрометра осуществляется численным расчётом разности хода оптических путей в материале объект-микрометра и воздухе [3].

Результаты и заключение

В ходе экспериментальных работ, из записанной цифровой голограммы были восстановлены фазовые изображения калибровочного слайда (Рисунок 1), которые в результате численной обработки были преобразованы в диаграммы распределения глубины (Рисунок 2), на основании которых была определена глубины канавок фазового объект микрометра. Согласно полученным измерениям, она составила около 255 нм, что на 19% меньше заявленной производителем. Учитывая простоту схемы и скорость проведения измерений, данная схема может применяться для быстрого определения трёхмерных размеров исследуемого образца.

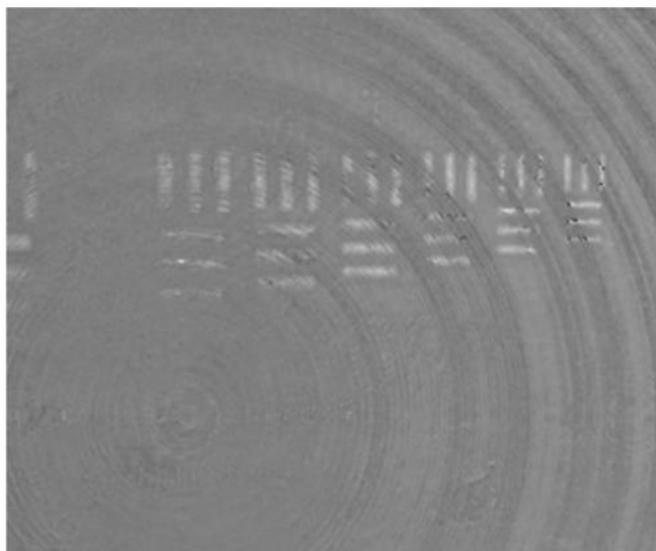


Рис. 1. Фазовое изображение объект-миниатюры

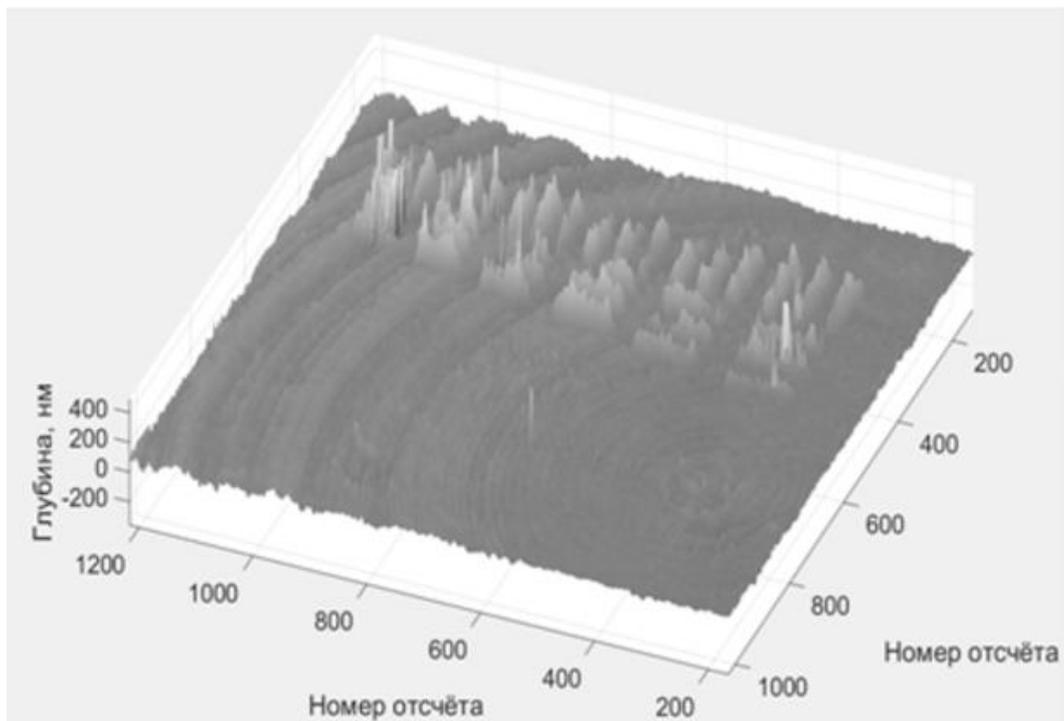


Рис. 2. Диаграмма распределения глубины

Литература

- [1] Kim J., Li Y., Miskiewicz M. N., Oh C., Kudenov M.W., Escuti M.J. Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts //Optica. – 2015. – V. 2. – Is. 11. – P. 958-964.
- [2] Chernykh A.V., Ezerskii A.S., Georgieva A.O., Petrov N.V. Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens //Holography, Diffractive Optics, and Applications XI. – SPIE, 2021. – V. 11898. – P. 113-120.
- [3] Godden T.M., Muñiz-Piniella A., Claverley J.D., Yacoot A., Humphry M.J. Phase calibration target for quantitative phase imaging with ptychography //Optics express. – 2016. – V. 24. – Is. 7. – P. 7679-7692.

УДК 535.421, 535.15

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФОТОПОЛИМЕРА BAYFOL HX В ИК ОБЛАСТИ

Владимир Николаевич Борисов*, Андрей Дмитриевич Зверев*, Владимир Александрович Камынин*, Мария Сергеевна Копьева**, Роман Александрович Окунь*, Владимир Борисович Цветков*

**Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия*

***Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия*

Аннотация

В работе исследован потенциал использования дифракционных элементов на базе голографического фотополимера Bayfol HX в ближнем инфракрасном диапазоне. На сегодняшний день абсолютное большинство применений исследуемого фотополимера связано с видимым диапазоном длин волн. Проведено сравнение модуляции показателя преломления исследуемого фотополимера в видимом и инфракрасном диапазонах. Показано, что динамический диапазон показателя преломления существенно не уменьшается в инфракрасном спектральном диапазоне по сравнению с видимым спектральным диапазоном. Исследовано поведение материала при записи голографических решеток с периодами из широкого диапазона (414–2100 нм). Показано ярко выраженное нарушение закона взаимозаменяемости при масштабировании записываемой голограммы. Найдены оптимальные условия записи для создания голограмм, рассчитанных под инфракрасный спектральный диапазон. Исследованный голографический материал демонстрирует высокий потенциал для использования в телекоммуникационной оптике

Ключевые слова

Голография, Bayfol, фотополимер, ИК излучение, дифракционная оптика

CHARACTERIZATION OF THE HOLOGRAPHIC PHOTOPOLYMER BAYFOL HX IN THE IR REGION

Vladimir N. Borisov, Andrey D. Zverev, Vladimir A. Kamynin, Maria S. Kopyeva, Roman A. Okun, Vladimir B. Tsvetkov

**Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

***Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The potential of using holographic diffractive elements based on the Bayfol HX holographic photopolymer in the near infrared range has been studied in this work. To date, the vast majority of applications of the studied photopolymer are associated with the visible wavelength range. The modulation of the refractive index of the studied photopolymer in the visible and infrared spectral ranges is compared. It is shown that the dynamic range of the refractive index does not decrease significantly in the infrared spectral range compared to the visible spectral range. The behavior of the photopolymer during the recording of holographic gratings with periods from a wide range (414–2100 nm) has been studied. A pronounced violation of the reciprocity is shown with scaling of the recorded hologram. The optimal recording conditions for creating holograms designed for the infrared spectral range are found. The studied holographic photopolymer demonstrates a high potential for use in telecommunication optics

Keywords

Holography, Bayfol, photopolymer, IR radiation, diffractive optics

Введение

Дифракционная оптика на основе голографических решеток является в настоящее время распространенным способом управления излучением в широких спектральных диапазонах от ближнего ультрафиолета (УФ) до среднего инфракрасного (ИК) диапазона. При решении различных задач возникает потребность как в высокоселективных (брэгговские зеркала) так и в низкоселективных (спектральные фильтры, диспергирующие элементы) голографических дифракционных элементах. Наиболее распространенным и коммерчески успешным голографическим фотополимером позволяющим получать

низкоселективные голографические структуры является Baufol HX 200. На данный момент абсолютное большинство применений материала ограничено видимым диапазоном длин волн. Основным интерес данной работы относится к возможности применения голографических элементов, записанных в фотополимере Baufol HX, в ближнем ИК диапазоне (длина волны 1–2 мкм).

Задачи исследования и методы

Первый вопрос, исследуемый в данной работе – возможность достижения высокой модуляции показателя преломления в фотополимере Baufol в ИК диапазоне, находящемся на достаточном спектральном отдалении от максимума модуляции коэффициента экстинкции (в УФ области). При изучении других материалов было показано, что модуляция показателя преломления асимптотически уменьшается при отдалении от максимума модуляции коэффициента экстинкции [1]. Для этого в схеме (Рис. 1) записана серия решеток с разными периодами, оптимизированными под разные спектральные диапазоны. Далее поведение голограмм проанализировано посредством измерения контуров угловой селективности в спектральной области 405–2100 нм.

Второй вопрос, исследуемый в данной работе – выраженное нарушение закона взаимозаменяемости при уменьшении пространственной частоты голограммы. Закон взаимозаменяемости выполняется в том случае, если распределение динамического диапазона показателя преломления голограммы зависит только от плотности энергии экспозиции (дозы) и инвариантно способу ее достижения. Для анализа нарушения закона взаимозаменяемости записаны несколько серий решеток с разными периодами, неизменной дозой и переменными временем экспозиции и плотностью мощности записывающего излучения. Результаты обрабатывались в соответствии с моделью полимеризации и линейной диффузии в фотополимерах [2], и с использованием измененной формулы отношения скоростей диффузии и полимеризации:

$$R * \frac{k}{D} = \frac{K^2}{I},$$

где K – длина вектора решетки, I – плотность мощности записывающего излучения, k и D – неизвестные материальные константы, описывающие скорости диффузии и полимеризации, являющиеся коммерческой тайной. Расчет позволил сопоставить модуляцию первой гармоники показателя преломления (n_1) с условиями записи (Рис. 2).

Л – лазер ($\lambda = 640\text{нм}$)

Т – телескоп

СК – светоделительный кубик

З – зеркало

Ф – фотополимер

ТС – темное стекло

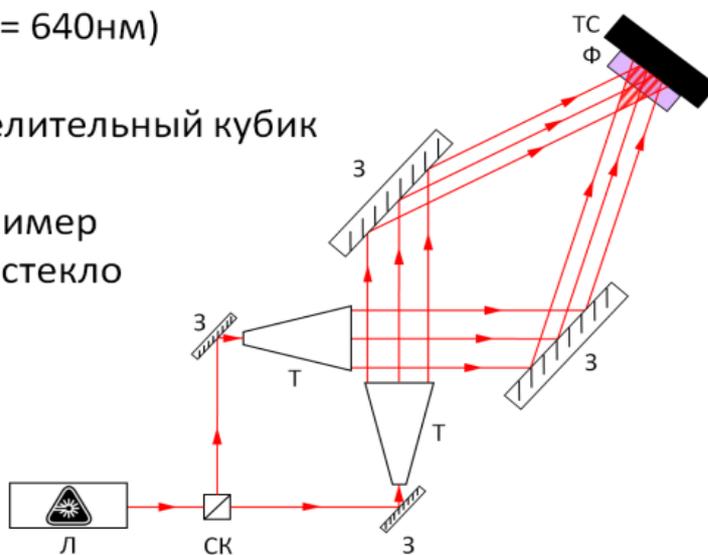


Рис. 1. Схема записи

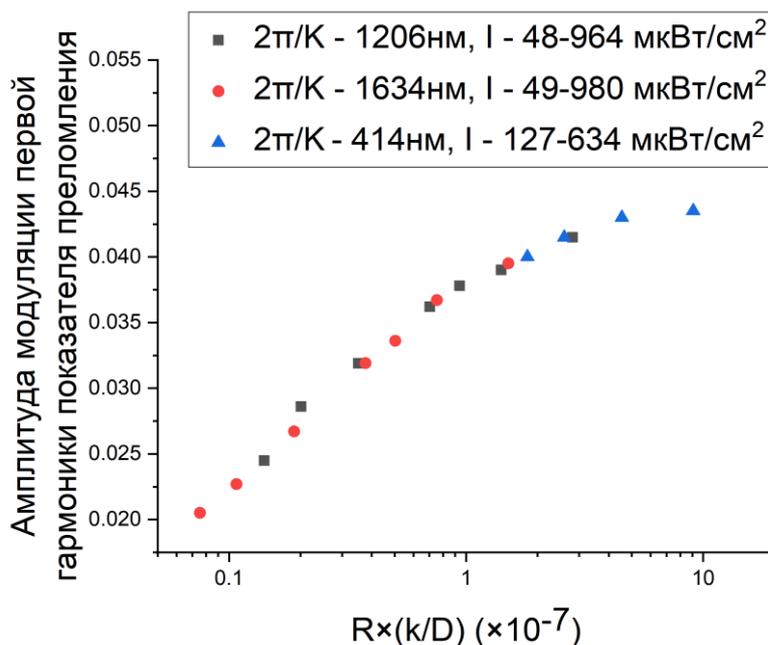


Рис. 2. Распределение n_1 записанных голограмм от отношения квадрата длины вектора решетки к плотности мощности записи

Заключение

В работе показано, что модуляция показателя преломления голограмм, записанных в Bayfol HX 200, значимо не уменьшается в ближнем ИК диапазоне по сравнению с видимым диапазоном спектра. В частности, фотополимер позволяет получать голограммы с эффективностью $> 97\%$ на длинах волн восстановления около 1,55 мкм, что делает его привлекательным материалом для изготовления дифракционной оптики для телекоммуникационных применений. Анализ нарушения закона взаимозаменяемости позволил выявить оптимальные условия для записи голограмм с наиболее сильным первым порядком дифракции для широкого диапазона периодов (414–1634 нм).

Литература

- [1] Borisov V.N., Angervaks A.E., Ryskin A.I., Veniaminov A.V. Two-model spectral study of volume holograms in materials with diffusion-based mechanisms //Optical Engineering. – 2019. – V. 58. – Is. 2. – P. 024102.
- [2] Sheridan J T., Lawrence J.R. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer //JOSA A. – 2000. – V. 17. – Is. 6. – P. 1108-1114.

УДК 535.4

ИТЕРАЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФАЗОВЫХ ОСЕВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ В РАСХОДЯЩИХСЯ ПУЧКАХ

Дарья Денисовна Деревеницкая, Виталий Вячеславович Краснов, Евгений Юрьевич Злоказов,
Тимур Замирович Миниханов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Аннотация

Предложен итерационный метод оптического синтеза бинарных фазовых осевых голограмм Френеля в расходящихся пучках. Полученные дифракционные оптические элементы (ДОЭ) не имеют несущей пространственной частоты, по сути являются киноформами. Такие ДОЭ формируют единственный сфокусированный порядок дифракции. По результатам оптических экспериментов улучшение оптического качества восстановленных с ДОЭ изображений составило 32% по нормированному среднеквадратическому отклонению (НСКО). Предложенный метод позволяет существенно повысить оптическое качество реконструкции изображений с ДОЭ в том числе за счет учета особенностей и дефектов оптической системы на этапе синтеза голограмм

Ключевые слова

Оптический синтез, итерационные методы, фазовые голограммы, алгоритм прямого поиска со случайной траекторией, цифровые голограммы

OPTICAL SYNTHESIS OF PHASE INLINE FRESNEL HOLOGRAMS IN DIVERGENT BEAMS

Daria D. Derevenitckaia, Vitaly V. Krasnov, Evgenii Yu. Zlokazov, Timur Z. Minikhanov

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Abstract

A method for an iterative optical synthesis of binary phase inline Fresnel holograms is proposed. The resulting diffractive optical elements (DOEs) don't have a carrier spatial frequency. The illuminated hologram forms a single diffraction order. Elements of kinoform are sequentially switched to obtain lower normalized standard deviation of reconstructed image from desired image. By experiments, the improvement of optical quality of reconstructed images is verified. The normalized standard deviation value was decreased by 32%

Keywords

Optical synthesis, iterative techniques, phase hologram, direct search with random trajectory, digital hologram

Введение

Фазовые голограммы активно применяются в науке и технике. Высокой энергетической эффективностью обладает такая разновидность голограмм, как киноформ, так как изображение восстанавливается в единственном дифракционном порядке. Предложенный в данной работе метод синтеза киноформов позволяет учесть особенности и дефекты оптической системы на этапе синтеза.

Метод и описание установки

Метод состоит из трех этапов. Первый осуществляется итерационным алгоритмом, подобным алгоритму Герчберга-Сэкстона [1]. Второй и третий этапы нацелены на снижение ошибки синтеза по результатам первого этапа и включают применение метода прямого поиска со случайной траекторией [2]. В данной работе первый и второй этапы синтеза проводились численно, а третий – оптически. Метод прямого поиска со случайной траекторией состоит в следующем. Вначале генерируется случайная траектория обхода. Затем в соответствии с траекторией меняется один элемент дифракционного оптического

элемента (ДОЭ). Получившийся ДОЭ выводится на пространственно-временной модулятор света. Восстановленное изображение регистрируется камерой и вычисляется целевая функция (ЦФ). Если значение ЦФ снизилось, то изменение сохраняется, а если нет – возвращается вариант, полученный на предыдущем шаге. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

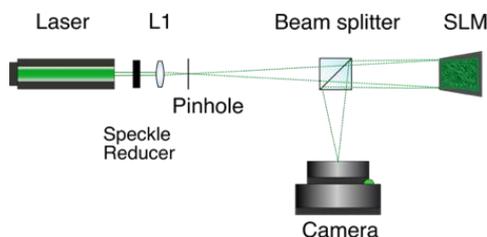


Рис. 1. Схема установки для оптического синтеза

Результаты эксперимента

В эксперименте использовались три изображения размером 64x64 отсчетов (“cat”, “smile” и “rock”). Изображения размещались по центру области восстановления размером 128x128 отсчетов. Синтез ДОЭ производился с использованием двух градаций фазы. Размер ДОЭ составил 128x128 отсчетов. Для того чтобы получить единственный сфокусированный порядок дифракции, данные ДОЭ должны освещаться расходящейся волной определённого радиуса кривизны. На рис. 2 представлены результаты синтеза ДОЭ и оптического восстановления изображений с них.

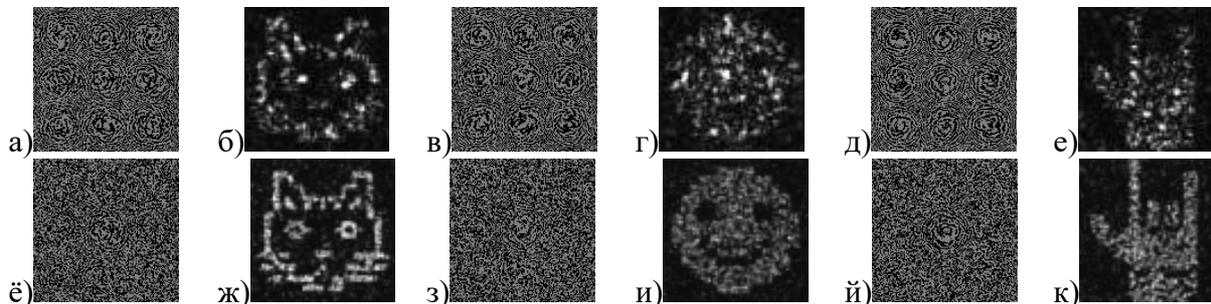


Рис. 2. Результаты численного (а – е) и оптического (ё – к) синтеза ДОЭ, а также оптического восстановления изображений с них

Заключение

Эксперимент показал, что предложенный метод итерационного оптического синтеза бинарных фазовых осевых голограмм Френеля позволяет повысить оптическое качество восстановленных изображений до 32% по НСКО.

Литература

- [1] Gerchberg W.O., Saxton R.W. A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures. //Optik (Stuttg), – 1972. – V. 35. – Is. 2. – P. 237-246.
- [2] Краснов В.В., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю. Метод формирования единственного сфокусированного порядка дифракции при помощи бинарных амплитудных дифракционных элементов без пространственной несущей //Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 4. – С. 436-442.

УДК 535.06:004.06

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АМПЛИТУДНЫМ ДИФРАКЦИОННЫМ
ОПТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТАМ БЕЗ НЕСУЩЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Андрей Сергеевич Овчинников, Виталий Вячеславович Краснов, Екатерина Алексеевна Савченкова

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Аннотация

Проведено исследование методов бинаризации для амплитудных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) без несущей пространственной частоты. По результатам численного и оптического восстановления изображений и дальнейшего расчёта показателей эффективности выбраны лучшие методы бинаризации для амплитудных ДОЭ без несущей пространственной частоты

Ключевые слова

Бинаризация, локальные методы, глобальные методы, диффузия ошибки, итерационное разбиение на сегменты, индекс структурного сходства

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21–79–00117

**COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF BINARIZATION METHODS OF VARIOUS
TYPES APPLIED TO AMPLITUDE DIFFRACTION OPTICAL ELEMENTS
WITHOUT A CARRIER SPATIAL FREQUENCY**

Andrey S. Ovchinnikov, Vitaly V. Krasnov, Ekaterina A. Savchenkova

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

Abstract

A study of binarization methods for amplitude diffraction optical elements (DOE) without a carrier spatial frequency has been carried out. Based on the results of numerical and optical image reconstruction and further calculation of efficiency indicators, the best binarization methods for amplitude DOE without a carrier spatial frequency were found

Keywords

Binarization, local methods, global methods, error diffusion, iterative segmentation, structural similarity index

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (RSF), grant No. 21-79-00117

Бинаризация ДОЭ необходима для их дальнейшей печати или вывода на микрзеркальные модуляторы света. Синтез ДОЭ осуществляется в два этапа. Первый — основан на итерационном методе Герчберга–Сэкстона. Необходимое число итераций определяется по наступлению стагнации значения целевой функции, в роли которой выступает суперпозиция нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) и дифракционных потерь. В конце осуществляется бинаризация получившегося ДОЭ. Второй этап нацелен на снижение ошибки синтеза по результатам первого этапа и включает применение метода прямого поиска со случайной траекторией. Для синтеза ДОЭ в качестве тестовых объектов были использованы два полутоновых и одно бинарное изображение. Параметры входных изображений: размер — 256x256 пикселей для полутоновых изображений, 270x270 пикселей для бинарного изображения; количество градаций яркости — 256 (у полутоновых изображений). Локальные методы бинаризации основаны на том, что параметры, такие как локальное среднее, среднее отклонение, рассчитываются исходя из значений, лежащих в окне, которое пробегает все пиксели изображения. Глобальные методы бинаризации основаны на том, что параметры, такие как глобальное среднее и дисперсия, рассчитываются исходя из всех значений уровня серого на изображении. Методы диффузии ошибки бывают трёх типов: стандартные, точечные и диагональные. Все они основаны на последовательном сравнении сигнала пикселей изображения с некоторым

пороговым значением, а затем распределением значения ошибки (разницы между исходным и полученным сигналом в пикселе) с различным весовым коэффициентом между соседними пикселями. Принцип действия итерационных методов бинаризации основан на разделении исходного распределения на сегменты и последующем нахождении порогового значения для бинаризации каждого получившегося сегмента.

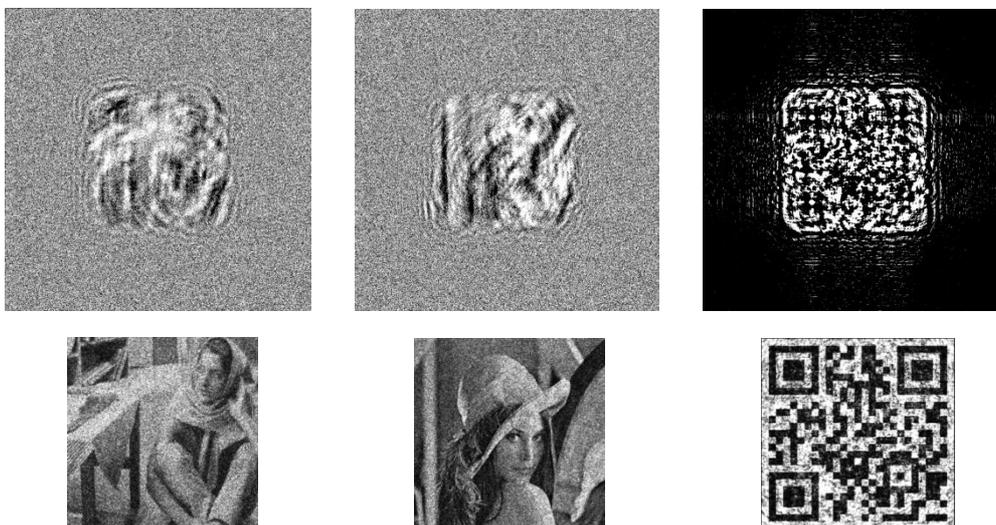


Рис. 1. Примеры бинаризованных ДОЭ сверху и восстановленных с них изображений (внизу)

В ходе проведённых численных экспериментов было определено, что глобальные методы бинаризации показали лучшие результаты. Методы диффузии ошибки и локальные методы бинаризации показали результаты в среднем на 30% хуже, чем лучшие глобальные методы – Ли, Отсу, Фансалкара и Киттлера.

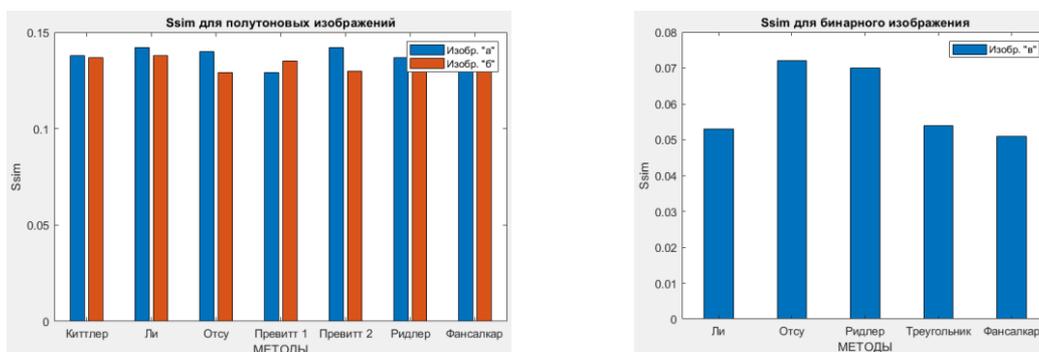


Рис. 2. Гистограммы значений параметра Ssim оптически восстановленных изображений для полутонных входных изображений (слева) и для бинарного изображения (справа)

Проведённые оптические эксперименты позволили определить лидирующие методы по значению параметра эффективности, такого как Ssim. Значения параметра Ssim для этих методов показаны на рисунке 2. Один из лучших результатов показал метод Ли. Для полутонных изображений значение параметра Ssim в среднем равно 0,140, что на 4% лучше, чем для остальных методов. В сравнении с параметром Ssim для метода Отсу, метод Ли показал результат на 1% лучше. Для бинарного изображения значение параметра Ssim составляет 0,053, что сравнимо со значениями параметров остальных методов, кроме метода Отсу. Для бинарного изображения метод Отсу показал лучшие результаты (параметр Ssim равен 0,072, что в среднем на 26% лучше, чем для остальных методов).

УДК 532.4:006.354

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОВЫХ ЖК ПВМС HOLOEYEPLUTO-2 VIS-016 И HOLOEYEGAEA-2 VIS-036

Тимур Замирович Миниханов, Евгений Юрьевич Злоказов, Виталий Вячеславович Краснов,
Дарья Денисовна Деревеницкая

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Аннотация

В работе проводилось исследование динамических характеристик фазовых жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света HoloEyePLUTO-2 VIS-016 и HoloEyeGAEA-2 VIS-036. Был проведен эксперимент с использованием компьютерно-синтезированных фокусирующих фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) без пространственной несущей, по результатам которого были определены временные характеристики отклика модуляторов. Кроме того, была определена максимальная частота, с которой можно выводить ДОЭ на экран HoloEye PLUTO-2 VIS-016

Ключевые слова

Пространственно-временные жидкокристаллические модуляторы, время отклика, фазовые дифракционные оптические элементы, динамические характеристики ЖК ПВМС

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PHASE OF THE LC SLM HOLOEYE PLUTO 2 VIS-016 AND HOLOEYE GAEA-2 VIS-036

Timur Z. Minikhanov, Evgenii Yu. Zlokazov, Vitaly V. Krasnov, Daria D. Derevenickaia

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Abstract

We analyzed time dynamics of phase modulation of the liquid crystal spatial light modulators HoloEye PLUTO 2 VIS-016 and HoloEye GAEA-2 VIS-036. The experiment for measuring time characteristics of SLM's response, such as lengths of response fronts, using computer-generated focusing phase diffractive optical elements (DOE) without a spatial carrier frequency, was carried out. In addition, we determined the maximum switch rate of DOE on the modulator's screen

Keywords

Liquid crystal on silicon spatial light modulator, response time, phase diffractive optical elements, dynamic characteristics of phase of the LC SLM

Введение

В настоящее время во многие оптические системы, где необходимо применение дифракционных элементов, активно интегрируются пространственно-временные модуляторы света [1]. Часто требуется оперативная смена кадров на модуляторах, однако реальная скорость обновления может оказаться существенно ниже кадровой частоты. Несмотря на заявленную в документации к устройству частоту обновления кадров, ЖК модуляторы не способны корректно отображать дифракционные элементы на этой частоте, что может приводить к некорректной работе всей системы.

Зачастую в документации указывается время отклика модулятора, но далеко не для всех наиболее часто используемых длин волн, поэтому были определены временные характеристики отклика модулятора – длительности переднего и заднего фронтов для модуляторов HoloEyePLUTO-2 VIS-016 и HoloEyeGAEA-2 VIS-036.

Измерение временных характеристик ЖК ПВМС

На рис. 1 приведена схема установки, собранной для эксперимента. Основными элементами схемы являются: лазер Cobolt Samba 200, генерирующий излучение на длине волны 532 нм, высокоскоростная камера Flare 48M CoaXPress (СХР) и ЖК ПВМС. Для исследования временной динамики модуляции фазы ЖК ПВМС использовались компьютерно-синтезированные фазовые бинарные дифракционные оптические элементы (ДОО) без пространственной несущей, которые выводились на экран модулятора с частотой 2 Гц.

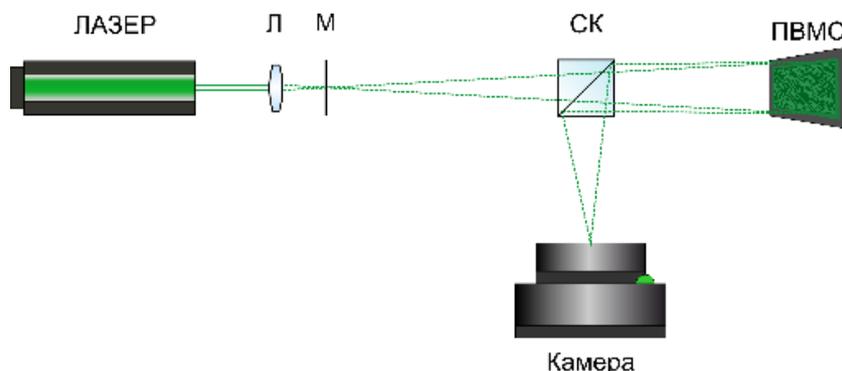


Рис. 1. Схема установки для исследования временной динамики модуляции: Л – линза, М – микроапертура, СК – светоделительный куб, П – поляризатор, ПВМС – пространственно-временной модулятор света

Восстановленные изображения, зарегистрированные камерой с частотой съемки в 1 кГц, представляли собой точки с различным смещением относительно центра изображения, по интенсивности которых и определялась временная динамика модуляции. Пример зависимости интенсивности первого порядка дифракции от времени для HoloEyePLUTO-2 VIS-016 представлен на рисунке 2. В результате проведенных измерений времен между уровнями значений интенсивности 10% и 90% от максимальной величины, получены значения длительностей передних и задних фронтов отклика ЖК ПВМС, которые составили $147,4 \pm 1,1$ и $96,9 \pm 0,3$ мс соответственно. При этом в документации к ПВМС указываются длительности фронтов 56 и 65 мс, соответствующие глубине модуляции 2π на длине волны 633 нм. Этот метод измерения временных характеристик был использован и для HoloEyeGAEA-2, на котором были зарегистрированы скачки фазового сдвига во время экспозиции (рис. 3).

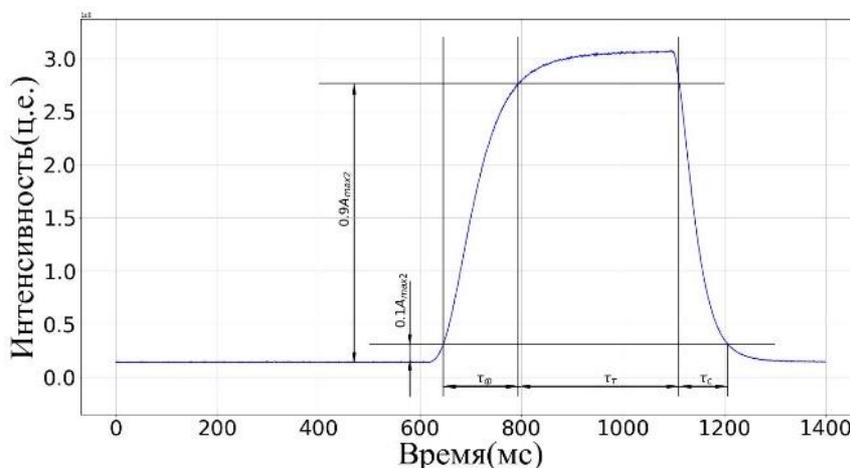


Рис. 2. Временные характеристики модулятора HoloEyePLUTO-2 VIS-016

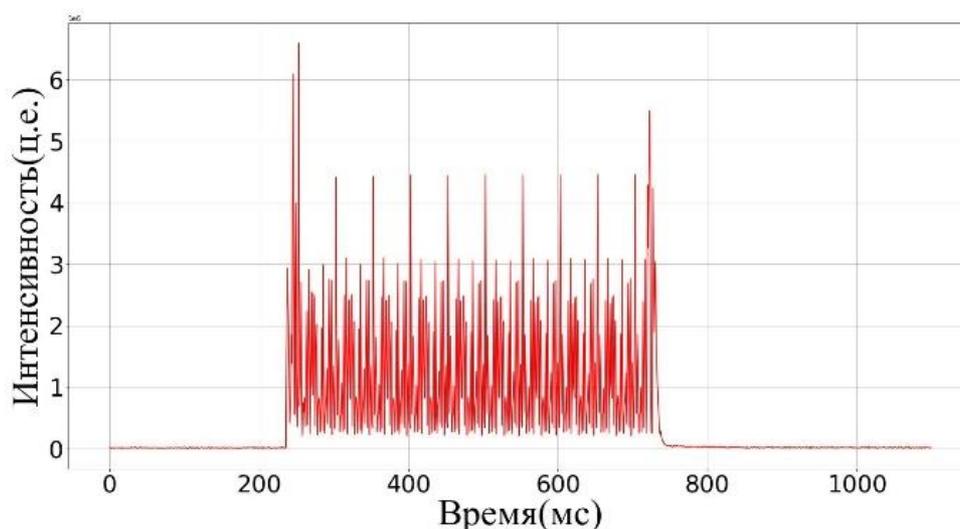


Рис. 3. Временные характеристики модулятора HoloEyeGAEA-2 VIS-036

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что максимальная частота, с которой можно выводить ДОЭ на модуляторе HoloEyePLUTO-2 VIS-016 составляет не более 3 Гц, что в 20 раз меньше кадровой частоты. У модулятора HoloEyeGAEA-2 VIS-036 обнаружены нестабильности фазового сдвига в течение экспозиции. Обнаружен прецессирующий процесс на характерных частотах 20 Гц, 100 Гц и 300 Гц.

Литература

- [1] Toyoda H. Application of liquid crystal on silicon spatial light modulator //2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments. – SPIE, – 2015. – V. 9618. – P. 26-29.
- [2] Краснов В.В., Стариков Р.С., Злоказов Е.Ю. Метод формирования единственного сфокусированного порядка дифракции при помощи бинарных амплитудных дифракционных элементов без пространственной несущей //Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №4. – С. 436–442.

УДК 681.784

ПОЛИХРОМНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОЖНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ

Кирилл Вадимович Зайченко*, Борис Симхович Гуревич*, Виталия Игоревна Святкина**

**Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

Важнейшая проблема ранней диагностики кожных онкологических заболеваний может быть решена с использованием методов фотоники. В работе рассмотрен авторский многоспектральный метод анализа изображений участков кожи с использованием нового специализированного полихромного источника света с программно управляемой длиной волны излучения. Проанализирован принцип действия источника и обосновано применение набора светодиодов со специальным расположением, позволяющим направлять пучок света любой длины волны в одном направлении. Описан вариант макета такого источника света. Показано, что оптимальным способом программного управления длиной волны является ее грубая настройка переключением светодиодов и тонкая настройка с помощью установленных на выходе источника акустооптических перестраиваемых фильтров

Ключевые слова

Источник света, рак кожи, программное управление, набор светодиодов, акустооптические перестраиваемые фильтры

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки РФ, госзадание № 075–00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011

POLYCHROMIC LIGHT SOURCE FOR THE REALIZATION OF MULTISPECTRAL PROCESSING METHOD OF SKIN MALIGNANT LESIONS IMAGES

Kirill V. Zaichenko, Boris S. Gurevich, Vitaliya I. Svyatkina

**Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

***Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract

The important problem of the skin cancer diagnostics can be solved using the photonics methods. The author's multispectral method of the skin pieces images analysis has been considered by means of application of the new polychromic light source with programmable control of the irradiation wavelength. The source operation principle has been analyzed, and application of the LED set with specific location allowing to direct light beam with any wavelength into one direction, has been proved. The light source mock-up experimental realization has been described. It has been shown that the optimal way of the wavelength programmable control is its rough tuning by LEDs switching and fine tuning by the output application of acousto-optic tunable filters

Keywords

Light source, skin cancer, programmable control, LEDs set, acousto-optic tunable filters

Acknowledgements

The work has been supported by Education and Science Ministry of Russian Federation, State task No. 075-00761-22-00, project No. FZZM-2022-0011

Введение

Разработка методов ранней диагностики злокачественных новообразований кожи является весьма актуальной проблемой, поскольку в общей структуре онкологических заболеваний в РФ рак кожи является лидирующим, что подтверждается существенным ростом числа таких пациентов в последнее время. Это вызвано, в частности, несвоевременным выявлением данных патологий [1], так как существующие сегодня методы диагностики злокачественных новообразований кожи обладают рядом

существенных недостатков и, зачастую, не могут обеспечить надежное выявление этих патологий на ранних стадиях [2]. Активное развитие методов, основанных на принципах фотоники, дает возможность решать задачу ранней диагностики рака кожи, исключая неопределенности, возникающие в результате визуального осмотра новообразования. Эти неопределенности обусловлены ограниченными возможностями человеческого глаза, неспособного отличать чистые спектральные цвета от составных. Наибольшую популярность приобрели метод рамановской спектроскопии, а также метод, основанный на явлении автофлуоресценции [3, 4]. Однако они также обладают рядом недостатков, одним из которых является потеря части информации из-за ограниченного числа длин волн, на которых проводятся измерения.

Принцип работы полихромного источника света

Нами разрабатывается метод многоспектральной обработки изображений кожных новообразований [5], в основе которого заложено преобразование полихромного изображения в последовательность монохромных субизображений, каждое из которых представляет собой распределение интенсивности света на выбранной длине волны. Чем больше число используемых длин волн, тем больший объем спектральной информации можно получить в дополнение к пространственной информации. Обеспечивается это, в первую очередь, за счет применения специального источника света, позволяющего управлять длинами волн, необходимых для исследования рака кожи. Источник позволяет программно переключать длины волн светового потока на своем выходе. Он состоит из 8 светодиодов, расположенных по радиусу от центра дифракционной решетки. На фокусном расстоянии от них расположены сегменты линзы, которые формируют пучки коллимированного света. Все пучки света попадают в центр дифракционной решетки под углами падения, выбранными таким образом, чтобы первые дифракционные порядки от каждого пучка распространялись в одном направлении. Переключение длины волны осуществляется подачей тока на выбранный светодиод.

Макет полихромного источника света

Для применения в макете источника света рассматривались различные светодиоды с диапазоном длин волн 700–1100 нм. Выбор светодиодов осуществлялся путем оценки их габаритных и оптических характеристик. Были выбраны светодиоды SMB 1N 735 (727 нм); SMB 1N 780 (780 нм); SMB 1N 830 (834 нм); SMB 1N 880 (887 нм); SMB 1N 940 (941 нм); SMB 1N 980D (990 нм); SMB 1M 1050 (1047 нм); LED 11 HP (1085 нм). Описанная конфигурация источника света осуществляет программную грубую настройку длины волны света на 8 поддиапазонах. Для более тонкой программной настройки длины волны используются установленные на выходе источника света акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) на ячейках Брэгга. Точное значение длины волны задается программным путем частотой сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь ячейки Брэгга. В результате можно обеспечить освещение зоны новообразования светом с полосой пропускания порядка 10 нм.

Заключение

Источник света позволяет формировать субизображения на нескольких десятках длин волн и получать значительно больший объем спектральной информации, чем это обеспечивают другие спектрометрические методы. Полученная при этом спектральная и

пространственная информация позволит более точно определить как характер новообразования, так и его конфигурацию на коже человека.

Литература

- [1] Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries //CA: a cancer journal for clinicians. – 2021. – V. 71. – Is. 3. – P. 209-249.
- [2] Солодянкина Т.Н., Апанасевич В.И., Гурина Л.И. Дерматоскопия как метод диагностики меланомы кожи //Сибирский онкологический журнал. – 2009. – №. 5. – С. 63-66.
- [3] Zhao J., Lui H., Kalia S., Zeng H. Real-time Raman spectroscopy for automatic in vivo skin cancer detection: an independent validation //Analytical and bioanalytical chemistry. – 2015. – V. 407. – Is. 27. – P. 8373-8379.
- [4] Borisova E. et al. Autofluorescence spectroscopy of cutaneous neoplasia under ultraviolet, visible and near infrared excitation //Tissue Optics and Photonics. – SPIE, 2020. – V. 11363. – P. 100-104.
- [5] Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral selection using acousto-optic tunable filters for the skin lesions diagnostics //European Conference on Biomedical Optics. – Optical Society of America, 2021. – P. EM1A. 8.

УДК 535.324.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Илья Николаевич Павлов, Ирина Львовна Расковская, Сергей Александрович Шитов,
Галина Михайловна Янина

*Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, г. Москва,
Россия*

Аннотация

В работе дано описание метода лазерной рефрактографии. Рассмотрена рефракция лазерной плоскости в переходном слое на границе раздела двух жидкостей с отличающимися показателями преломления. Использована тангенциальная модель профиля показателя преломления, при помощи которой получены двумерные изображения лазерной плоскости при прохождении оптической неоднородности. Были получены экспериментальные и расчетные рефрактограммы для различных жидкостей с разными показателями преломления

Ключевые слова

Диффузионный слой жидкости, рефракция, взаимодиффузия

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору Ринкевичюсу Б.С., под руководством которого был разработан метод лазерной рефрактографии

INVESTIGATION OF THE DIFFUSION LAYER OF LIQUID BY LASER REFRACTOGRAPHY TECHNIQUE

Ilya N. Pavlov, Irina L. Raskovskaya, Sergey A. Shitov, Galina M. Yanina

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

Abstract

The paper describes the method of laser refractography. The refraction of a laser sheet in a transition layer at the interface of two liquids with different refractive indices is considered. A tangential model of the refractive index profile is used, with the help of which two-dimensional images of the laser plane are obtained during the propagation through an optical inhomogeneity. Experimental and calculated refractograms were obtained for various liquids with different refractive indices

Keywords

Liquid diffusion layer, refraction, mutual diffusion

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Professor Rinkevichyus B.S. under whose guidance the method of laser refractography was developed

Введение

Оптические измерения широко применяются в научных исследованиях благодаря многочисленным достоинствам, важнейшим из которых является отсутствие механических возмущений исследуемой среды. Одним из важных преимуществ является возможность бесконтактных измерений. Исследование диффузионного слоя проводится разными оптическими методами, например, с помощью интерферометрии [1]. Для исследования тонких фазовых объектов наиболее удобен интерферометр Маха-Цендера. Если необходимо высокое пространственное разрешение для наблюдений применяется метод лазерной многолучевой интерференционной микроскопии [2]. При прохождении пучка монохроматического света через клинообразную кювету возникает многолучевая интерференционная картина в виде системы параллельных светлых и темных полос. В рамках данной работы используется метод лазерной рефрактографии (ЛР) [3].

Рефрактографические методы исследования диффузионного слоя проводятся с использованием структурированного лазерного излучения (СЛИ). В рассмотренных случаях исследовалась рефракция цилиндрического и плоского лазерных пучков.

Метод лазерной рефрактографии

Метод ЛР основан на зондировании оптически неоднородной прозрачной среды СЛИ, цифровой регистрации и компьютерной обработке изображений искаженного СЛИ (рефрактограмм). Обобщенная схема экспериментальной установки, с помощью которой реализуется метод ЛР, представлена на рис. 1 [3]. Исследуемый диффузионный слой создается с помощью жидкостей с различными показателями преломления: снизу располагается раствор соли, а сверху – чистая вода. На их границе образуется переходный слой, в котором показатель преломления плавно изменяется от большего значения в соленой воде (более плотной среде) к меньшему значению в чистой, так как показатель преломления в слое жидкости зависит от значения солёности. На рис. 2 показана модель распределения показателя преломления. Данное распределение было построено на основе тангенциальной модели: $n(x) = \frac{n_1+n_2}{2} + \frac{n_1-n_2}{2} \operatorname{th}\left(\frac{x-x_s}{h}\right)$, где n_1 – показатель преломления менее плотной жидкости, n_2 – показатель преломления более плотной жидкости, h – характерная полуширина слоя, x_s – положение центра неоднородности.

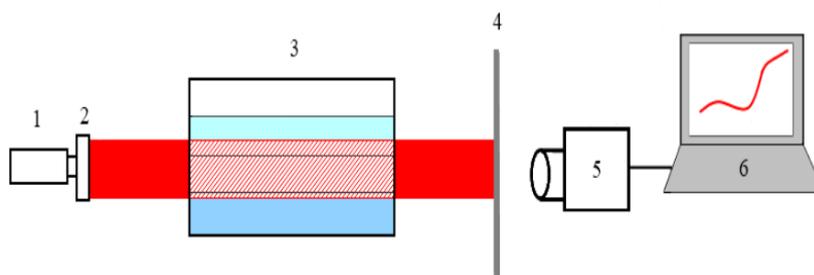


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования диффузионного слоя жидкости: 1 – лазер, 2 – оптическое устройство формирования плоского лазерного пучка, 3 – кювета с исследуемой двухслойной жидкостью, 4 – экран, 5 – цифровая фотокамера, 6 – персональный компьютер

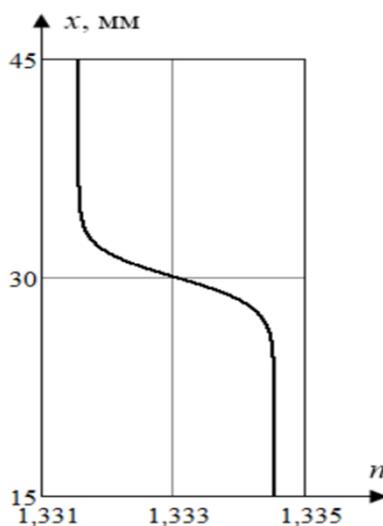


Рис. 2. Распределение показателя преломления

При помощи зависимости были смоделированы двумерные рефрактограммы, параметры x_s и h которых изменялись с целью получения наименьшего отклонения расчетной рефрактограммы от полученной в эксперименте. Показатели преломления n_1 , n_2 измерялись с помощью рефрактометра и полученные значения использовались при расчете.

Заключение

В выполненной работе были исследованы параметры диффузионного слоя методом ЛР. В результате проведенных исследований был определен профиль показателя преломления, позволяющий восстановить профиль солёности в стратифицированном водно-солевом растворе, был создан алгоритм компьютерного моделирования и обработки результатов.

Литература

- [1] Абрамов А.Ю., Диков О.В., Рябухо В.П., Шиповская А.Б. Исследование процессов взаимодействия в тонких прозрачных средах методами лазерной интерферометрии // Компьютерная оптика. – 2008. – V. 32. – Is. 3. – P. 253–264.
- [2] Костарев К.Г., Горохова С.В. Развитие неустойчивости межфазной границы в результате диффузии ПАВ в двухслойной системе жидкостей // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2019. – №3. – С. 19–27.
- [3] Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Исследование физических процессов в жидкости методом лазерной рефрактографии // XII Межд. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». – Москва: Издательский дом МЭИ, 2013.

УДК 535–14

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИСПЕРСИИ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА К8 В ТЕРАГЕРЦОВОМ
ДИАПАЗОНЕ**

Мария Андреевна Федянина*, Николай Сергеевич Балбекин,
Кирилл Вячеславович Пузановский*****

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

***Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

****Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар, Россия*

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы температурные зависимости показателей преломления и поглощения стекла К8 в терагерцовом (ТГц) диапазоне спектра. **Метод.** Исследования проводились с использованием ТГц спектрографа TeraK15 (Menlo Systems) на основе когерентного детектирования ТГц импульсов, с возможностью изменения температуры образца. **Основные результаты.** Показатели преломления и поглощения растут с изменением температуры от 298 до 383 К во всем исследованном спектральном диапазоне 0,25–0,5 ТГц. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при выборе материалов для кювет, предназначенных для терагерцовой спектроскопии жидкостей

Ключевые слова

Терагерцовый диапазон, терагерцовая спектроскопия, показатель преломления, показатель поглощения

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 19-42-230006 p_a) и КНФ (проект MFI-20.1/129)

**INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DISPERSION
OF THE REFRACTIVE INDEX OF K8 GLASS IN THE TERAHERTZ RANGE**

Maria A. Fedyanina, Nikolay S. Balbekin, Kirill V. Pyzanovskiy

**Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

***ITMO University, St. Petersburg, Russia*

****Kuban State University, Krasnodar, Russia*

Abstract

The temperature dependences of the refractive indices and absorption of K8 glass in the terahertz (THz) range of the spectrum are investigated. The studies were carried out using the Tera K15 THz spectrograph (Menlo Systems) based on coherent detection of THz pulses, with the possibility of changing the temperature of the sample. The refractive and absorption indices increase with a temperature changed from 298 to 383 K in the investigated spectral range of 0.25-0.5 THz. The obtained results can be used in the selection of materials for cuvettes intended for terahertz spectroscopy of liquids

Keywords

Terahertz range, terahertz spectroscopy, refractive index, absorption coefficient

Acknowledgements

The work was supported by RFBR (grant No. 19-42-230006 p_a) and KNF (project MFI-20.1/129)

Введение

ТГц-спектроскопия является перспективным и развивающимся методом исследования свойств различных материалов [1–2]. В случае анализа порошковых материалов, а также веществ, находящихся в жидкой и газообразной фазах, требуется применение кювет с известными диэлектрическими свойствами в ТГц диапазоне. Удобными материалами для таких кювет являются стекла, ТГц-характеристики которых должны быть известны [3].

В настоящем сообщении представлены результаты измерения показателей преломления и поглощения стекол К8 в частотном диапазоне 0,25–0,5 ТГц при температурах от 298 до 383 К.

Методика эксперимента

В экспериментах исследовались образцы стекла К8 с размерами $35 \times 32 \times 3$ мм³ и показателем преломления $n = 1,516$ на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Измерения спектральных зависимостей показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $\alpha(\lambda)$ проводились с помощью ТГц спектрографа TeraK15 (Menlo Systems) с возможностью изменения температуры образцов в диапазоне от $T=298$ до $T=383$ К. В экспериментах регистрировалась форма пикосекундного лазерного импульса, прошедшего через образец при различных температурах. Характерные временные зависимости для одного из исследованных образцов, показанные на рисунках 1 и 2, свидетельствуют о наличии температурной зависимости его диэлектрических свойств.

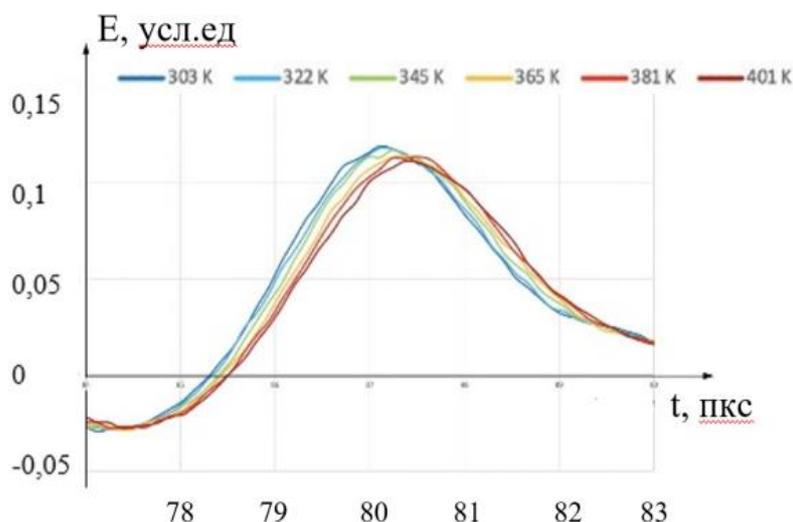


Рис. 1. Форма лазерного импульса после прохождения стекла К8 при температурах 303, 322, 345, 365, 381, 401 К

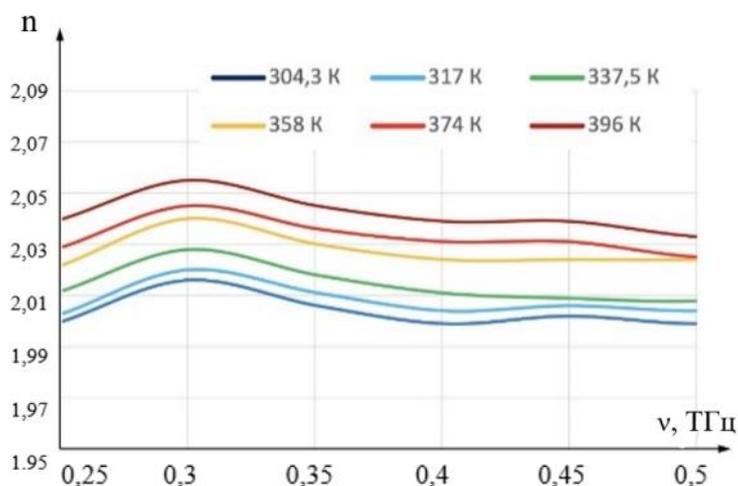


Рис. 2. Спектры показателя преломления (n) стекла К8 при температурах 304,3; 317; 337,5; 358; 374; 396 К

Обработка полученных выходных сигналов, осуществляемых методом преобразования Фурье в программной части спектрографа, позволила получить спектральные зависимости для показателей преломления и поглощения исследуемых образцов.

Результаты и обсуждение

Зависимости показателя преломления $n(\nu)$ для одного из исследованных образцов стекла К8 от частоты излучения ν , полученные в диапазоне температур $T=304\text{--}396\text{ К}$, представлены на рис. 2. Они показывают, что показатель преломления данного материала в диапазоне $0,5\text{--}0,25\text{ ТГц}$ с температурой увеличивается; при этом изменение температуры на 92 К приводит к его росту на заметную величину, $\Delta n \approx 0,04$. Исследования показателя поглощения показали, что он растет с частотой, достигая значений $\alpha \approx 12\text{ см}^{-1}$ для $\nu = 0,5\text{ ТГц}$ и $T = 303\text{ К}$. Увеличение температуры до $T = 400\text{ К}$ приводит к росту показателя поглощения на величину $\Delta \alpha \approx 2\text{ см}^{-1}$ во всем исследованном спектральном диапазоне.

Заключение

Проведенные с использованием ТГц спектрографа Tera K15 (Menlo Systems) исследования позволили измерить частотные зависимости показателей преломления и поглощения образцов стекла К8 в диапазоне $0,5\text{--}0,25\text{ ТГц}$ при температурах от 300 К до 400 К . Получено, что показатель преломления данного материала близок к $n=2$, а показатель поглощения растет с частотой, и при температурах, близких к комнатной, достигает значения $\alpha \approx 12\text{ см}^{-1}$ на частоте $\nu=0,5\text{ ТГц}$. Это следует учитывать при использовании стекла К8 в качестве материала для кювет, а также предметных и покровных стекол, при спектроскопических исследованиях материалов в ТГц-диапазоне.

Литература

- [1] Ueno Y., Ajito K. Analytical terahertz spectroscopy // Analytical Sciences. – 2008. – V. 24. – Is. 2. – P. 185-192.
- [2] Hangyo M., Tani M., Nagashima T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: a review // International journal of infrared and millimeter waves. – 2005. – V. 26. – Is. 12. – P. 1661-1690.
- [3] Голубева И.А. Исследование свойств полимерных стекол методом импульсной терагерцовой спектроскопии // МНСК Фотоника и квантовые оптические технологии. – 2019. – Сборник тезисов конференции – С. 11.

УДК 535.317.1

СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХВОЛНОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЗРАЧНЫХ НАНОЖИДКОСТЯХ В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Андрей Дмитриевич Ремзов, Максим Валерьевич Савельев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Аннотация

Предмет исследования. Проведен теоретический анализ пространственно-временных характеристик четырехволновых преобразователей излучения в H_2O и C_2H_5OH растворах наночастиц полистирола, при распространении волн накачки ортогонально силе тяжести. **Метод.** Пространственный спектр объектной волны получен с использованием приближения заданного поля по непрерывным волнам накачки. **Основные результаты.** Показано, что вблизи нулевой пространственной частоты в модуле амплитуды объектной волны присутствует провал. Для H_2O и C_2H_5OH растворов наночастиц полистирола проведены расчеты полуширины провала в зависимости от времени и радиуса наночастиц с учетом силы тяжести. Существует оптимальное время, при котором полуширина провала минимальна. Переход от H_2O раствора к C_2H_5OH приводит к уменьшению этого времени примерно в 5 раз. Также наблюдается его уменьшение с ростом радиуса наночастиц. **Практическая значимость.** Результаты могут быть использованы для создания систем нелинейной адаптивной оптики на основе жидкостей, содержащих наночастицы, в задачах коррекции мелкомасштабных фазовых искажений

Ключевые слова

Четырехволновой преобразователь излучения, прозрачная наножидкость, поле тяжести Земли

COMPARISON OF SPACE-TIME CHARACTERISTICS OF FOUR-WAVE RADIATION TRANSDUCERS IN TRANSPARENT NANOFUIDS IN THE EARTH'S GRAVITY FIELD

Andrey D. Remzov, Maxim V. Savelyev

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

A theoretical analysis of the space-time characteristics of four-wave radiation converters in H_2O and C_2H_5OH solutions of polystyrene nanoparticles is carried out with the propagation of pump waves orthogonally to gravity. Spatial spectrum of the object wave is obtained using the approximation of a given field by continuous pump waves. Shown that there is a dip near the zero spatial frequency in the amplitude modulus of the object wave. The half-width of the dip was calculated depending on the time and radius of the nanoparticles for H_2O and C_2H_5OH solutions of polystyrene nanoparticles taking into account gravity. There is an optimal time at which the half-width of the dip is minimal. The transition from an H_2O to C_2H_5OH solution reduces this time by about 5 times. It also decreases with increasing nanoparticles radius. The results can be used to create systems of nonlinear adaptive optics based on liquids containing nanoparticles in problems of correction of small-scale phase distortions

Keywords

Four-wave radiation converter, transparent nanofluid, Earth's gravity field

Введение

Многокомпонентные среды активно применяются в исследованиях нелинейно-оптических процессов с использованием широкого диапазона длин волн [1–3]. В качестве основы они используются для построения четырехволновых преобразователей излучения (ЧПИ), осуществляющих обращение волнового фронта [4, 5].

К настоящему времени изучены пространственно-временные характеристики ЧПИ в прозрачном растворе наночастиц без учета действия силы тяжести [6]. Показано, что в модуле амплитуды объектной волны вблизи нулевой пространственной частоты имеется

провал, полуширина которого уменьшается с течением времени. Однако в работе [7] отмечено существование минимального значения полуширины провала за конечное время, что обусловлено силой тяжести наночастиц. Цель работы – сравнительный анализ пространственных и временных характеристик ЧПИ в прозрачных жидкостях, содержащих наночастицы, в поле тяжести Земли.

Результаты численного анализа

Получено выражение для временной зависимости пространственного спектра объектной волны на передней грани плоского слоя наножидкости. Анализ H_2O и C_2H_5OH растворов наночастиц полистирола показал существование провала в модуле амплитуды объектной волны [8]. Для диапазона радиусов наночастиц от 200 до 300 нм найдены оптимальные времена, при которых полуширина провала принимает минимальные значения. Замена H_2O раствора на C_2H_5OH уменьшила оптимальное время приблизительно в 5 раз из-за увеличения разности плотностей наночастиц и жидкости.

Заключение

Согласно результатам возможно управление оптимальными характеристиками ЧПИ путем подбора компонент наножидкости.

Литература

- [1] Tsuchiya T., Egami C. Degenerate four-wave mixing in phycoerythrin dye-doped nanoparticles //Hindawi. International Journal of Optics. – 2021. – V. 2021. – P. 5568693.
- [2] Kosionis S., Paspalakis E. Four-wave mixing in asymmetric double quantum dot molecule–metal nanoparticle assemblies //Materials Proceedings. – 2021. – V. 4. – P. 89.
- [3] Nallusamy N., Zu P., Raja R.V.J., Arzate N. Vigneswaran D., Degenerate four-wave mixing for measurement of magnetic field using a nanoparticles-doped highly nonlinear photonic crystal fiber //Applied Optics. – 2019. – V. 58. – Is. 2. – P. 333-339.
- [4] Ivanov V.I., Ivnova G.D., Myagotn A.V. Four-wave mixing in the transparent nanosuspension //Proceedings of SPIE. – 2019. – V. 11024. – P. 110240Y.
- [5] Савельев М.В., Ивахник В.В. Пространственная селективность четырёхволнового преобразователя излучения с учётом силы тяжести, действующей на растворённые в прозрачной жидкости наночастицы //Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, – № 8. – С. 694-703.
- [6] Ивахник В.В., Савельев М.В. Нестационарное четырёхволновое взаимодействие в прозрачной двухкомпонентной среде //Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, – № 2. – С. 227-235.
- [7] Ремзов А.Д., Савельев М.В. Пространственно-временные характеристики четырёхволнового преобразователя излучения в прозрачной наносuspензии с учётом поля тяжести Земли //Сборник трудов XI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, – 2022. – С. 539-540.
- [8] Ремзов А.Д., Савельев М.В. Встречное четырехволновое взаимодействие в прозрачной суспензии наночастиц в поле тяжести Земли //Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т. 85. – № 12. – С. 1770-1775.

УДК 535(06)+004(06)

К ВОПРОСУ АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Артур Олегович Гаугель, Александр Владимирович Павлов

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Показаны возможности и ограничения аппроксимации передаточной характеристики и автокорреляционной функции $4f$ схемы голографии Фурье гауссово-подобными функциями. Подход основан на фундаментальном свойстве ограниченности динамического диапазона голографических регистрирующих сред, ведущем к ограниченности частотного диапазона голограммы Фурье. В качестве передаточной характеристики взята зависимость локальной дифракционной эффективности голограммы Фурье от частоты по интенсивности. Методом численного моделирования найдена связь моделей передаточной характеристики и автокорреляционной функции. Показана возможность оптимизации по критерию относительной погрешности аппроксимации в требуемом диапазоне уровней дифракционных эффективностей и глобального максимума автокорреляционной функции.

Ключевые слова

Голография Фурье, передаточная характеристика, автокорреляционная функция, голографическая регистрирующая среда, дифракционная эффективность, аппроксимация

Благодарности

Авторы благодарят А.М. Алексеева за помощь в экспериментальной проверке

ON THE APPROXIMATION OF THE FOURIER-HOLOGRAPHY SCHEME CHARACTERISTICS

Artur O. Gaugel, Alexander V. Pavlov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper is devoted to the possibilities and limitations of approximation of the transfer characteristic and autocorrelation function $4f$ of the Fourier holography scheme by Gaussian-like functions. The approach is based on the fundamental property of the limited dynamic range of holographic recording media, leading to the limited frequency range of the Fourier hologram. The dependence of the local diffraction efficiency of the Fourier hologram on the frequency in intensity is taken as a transfer characteristic. The connection between the models of the transfer characteristic and the autocorrelation function is found by numerical modeling. The possibility of optimization by the criterion of the relative approximation error in the required range of levels of diffraction efficiencies and the global maximum of the autocorrelation function is shown.

Keywords

Fourier Holography, Transfer Characteristic, Autocorrelation Function, Recording Medium, Approximation

Acknowledgements

We thank Alexander M. Alekseev for his help in the experimental verification

Введение

При аналитическом и численном моделировании нужна удобная аппроксимация используемых характеристик. В рамках подхода линейных систем – её комплекснозначной передаточной функции и/или связанного с ним преобразованием Фурье импульсного отклика. Для схемы голографии Фурье обычно используются измеряемые по интенсивности: ПХ – зависимость локальной дифракционной эффективности голограммы от частоты и/или автокорреляционная функция (АКФ).

В предположении линейности голограммы Фурье ПХ соответствует спектру мощности эталонного изображения. Для реальной информации характерны по преимуществу степенные спектры мощности, не очень удобные при моделировании. Поэтому желательна аппроксимация степенных спектров и, соответственно, ПХ и АКФ функциями, более удобными с точки зрения наглядности и компактности выражений.

Поиску удобной и адекватной модели аппроксимации посвящен ряд работ, например, в [1], в рамках задачи распознавания изображений, подвергаемых аффинным преобразованиям, ПХ аппроксимирована треугольной функцией, в [2] показана необходимость учета всего спектра мощности при проективных преобразованиях, в [3] рассмотрена возможность аппроксимации функцией Гаусса. Но такая аппроксимация возможна лишь в ограниченном диапазоне параметров спектров мощности. В настоящей работе, в развитие [1–3], показана возможность аппроксимации ПХ и АКФ схемы голографии Фурье гауссово-подобными функциями, обобщающими функцию Гаусса.

Подход и содержание работы

Предложена аппроксимация ПХ схемы голографии Фурье при обработке изображений со степенными спектрами мощности функциями вида

$$H(\nu) = \exp \left(-\ln(\alpha) \cdot \left(\frac{-\nu}{\nu_\alpha} \right)^D \right), \quad (1)$$

где ν – пространственная частота, D – показатель степени, α – определяемый задачей и условиями записи голограммы уровень измерения параметра – частоты ν_α , а АКФ –

$$\mathcal{R}(\zeta) = \hat{F}H^+(\nu) = \hat{F} \exp \left(-\ln(\alpha) \cdot \left(\frac{-\nu}{\nu_\alpha} \right)^D \right) \approx \exp \left(-\ln(\beta) \cdot \left(\frac{\zeta}{\zeta_\alpha(D, \nu_\alpha)} \right)^{d(D)} \right), \quad (2)$$

где ζ – координата в выходной (корреляционной) плоскости, $d(D)$ – показатель степени, зависящий от показателя степени D в модели ПХ (1).

Подход правомочен в силу ограниченности динамического диапазона регистрирующих сред, ведущего к ограниченности частотного диапазона голограммы Фурье. С ростом показателя степени аргумента в модели спектра сужается диапазон аппроксимации, что позволяет достичь приемлемого значения относительной ошибки.

Методом численного моделирования определены зависимости $\zeta(D, \nu_\alpha)$ и $d(D)$ для диапазона значений $D \in [0.5, 4.0]$, показаны относительные ошибки аппроксимации для ряда значений D , дано сравнение с экспериментальными результатами.

Заключение

Таким образом, показана возможность аппроксимации передаточных характеристик и автокорреляционных функций схемы голографии Фурье гауссово-подобными функциями при обработке изображений со степенными спектрами мощности.

Литература

- [1] Шубников Е.И., Кулешов А.М. Влияние изменения масштаба и поворота изображения и сдвига фильтра на величину сигнала в голографическом корреляторе. //Оптика и спектроскопия, – 1983, – Т. 55, – № 1, – С. 161–165.
 [2] Павлов А.В. Об учете спектра и функции фильтра при численном моделировании влияния геометрических искажений на корреляцию изображений. //Оптика и спектроскопия. – 1995. – Т. 78, – № 1, – С. 152–157.
 [3] Алексеев А.М., Павлов А.В. Об аппроксимации передаточной функции 4f-схемы голографии Фурье при реализации нечетко-значимых логик. //Оптика и спектроскопия. – 2010, – Т. 108, – № 1, – С. 142–147.

УДК 535.417

ОЦИФРОВКА ОБЪЕКТНОЙ ВОЛНЫ, ВОССТАНОВЛЕННОЙ ИЗ АНАЛОГОВОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАММЫ, МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Анастасия Владимировна Прохорова, Екатерина Владимировна Рабош, Алексей Викторович Черных,
Николай Сергеевич Балбекин, Николай Владимирович Петров

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты регистрации цифровых голограмм реального объекта и восстановленной с аналоговой отражательной голограммы объектной волны, несущей информацию о реальном объекте. Аналоговая монохромная отражательная голограмма записана по методу Ю.Н. Денисюка. Для записи аналоговой и цифровых голограмм использован полупроводниковый лазер с центральной длиной волны 640 нм. Восстановленные путем численного расчета изображения сравнены путем вычисления их корреляции

Ключевые слова

Голография, Аналоговая голограмма, Цифровая голограмма

A DIGITAL HOLOGRAPHY APPROACH FOR DIGITIZING AN OBJECT WAVE RECONSTRUCTED FROM AN ANALOG REFLECTION HOLOGRAM

Anastasiia V. Prokhorova, Ekaterina V. Rabosh, Aleksey V. Chernykh, Nikolay S. Balbekin,
Nikolay V. Petrov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

This paper presents the results of registering digital holograms of a real object and an object wave reconstructed from the analogue reflection hologram, which carries information about the real object. Analog monochrome reflection hologram was recorded by the method of Yu.N. Denisyuk. Semiconductor laser with central wavelength of 640 nm was used for recording analogue and digital holograms. The images reconstructed by numerical computation were compared by calculating their correlation

Keywords

Holography, Analog Hologram, Digital Hologram

Введение

Голографические подходы позволяют восстанавливать информацию как об амплитуде, так и о фазе объектной волны. Самые простые монохромные аналоговые голограммы, зарегистрированные по методу Ю.Н. Денисюка, обладают колоссальной информационной емкостью, превосходящей на порядки емкость существующих твердотельных носителей [1]. Теоретически рассчитанное разрешение восстанавливаемого изображения (~300 нм) превосходит параметры матриц последнего поколения [2]. Наличие существенного превосходства по ряду характеристик обусловило появление и развитие направления художественной голографии, а также многих мультидисциплинарных областей, цели которых направлены в том числе на применение голографических методов на сохранение объектов культурного наследия [3]. Информационная емкость записанных в объемной фоточувствительной среде голограмм также открывает возможность использования голографических методов для долговременного хранения информации. Однако на сегодняшний день не существует отработанных методик и технологий для аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в восстановленном объектном волновом фронте.

Используемые методы и подходы

Для подготовки исследуемого объекта была использована экспериментальная схема для записи аналоговых голограмм по методу Ю.Н. Денисюка (рис. 1а). В качестве источника монохроматического излучения использован полупроводниковый лазер LASOS с центральной длиной волны $\lambda = 640$ нм. Реальный объект и фотография восстановленного изображения зарегистрированной голограммы представлены на рис. 1(б, в).

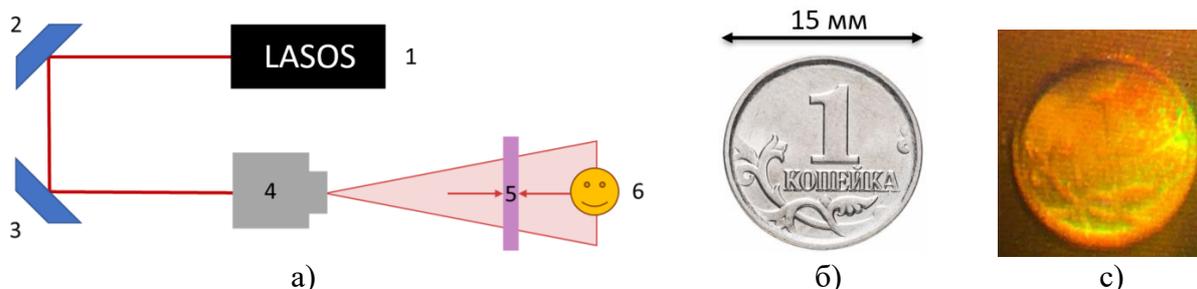


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для записи голограмм по методу Ю.Н. Денисюка (а), объект для записи голограммы (б) и зарегистрированная аналоговая отражательная голограмма (в)

На схеме использованы следующие обозначения: 1 – источник монохроматического когерентного излучения ($\lambda = 640$ нм), 2, 3 – зеркала, 4 – фильтр пространственных частот (ФПЧ), 5 – фоточувствительная пластина (ПФГ-03М), 6 – объект.

Запись цифровых голограмм выполнена на экспериментальной установке внеосевой голографии, представленной на рис. 2. Для записи голограмм объекта угол между опорным и предметным пучками составлял $\theta_1 = 2,5$ градуса. Для записи цифровой голограммы объектной волны, восстановленной из аналоговой голограммы, потребовалось изменить конфигурацию схемы экспериментальной установки так, чтобы излучение падало на голограмму под углом Брюстера.

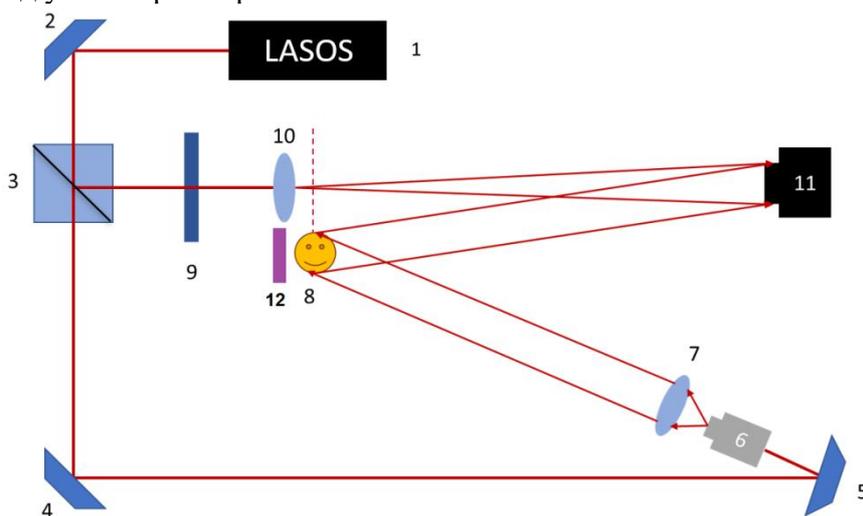


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для записи внеосевых цифровых голограмм

На схеме использованы следующие обозначения: 1 – источник монохроматического когерентного излучения ($\lambda = 640$ нм), 2, 4, 5 – зеркала, 3 – светоделительный кубик, 6 – фильтр пространственных частот (ФПЧ), 7, 10 – линзы, 8 – объект, 9 – нейтральный светофильтр, 11 – КМОП, 12 – аналоговая отражательная голограмма.

Результаты и заключение

Для восстановления изображений с линейным размером 207x207 пикселей (рис. 3) из цифровых голограмм было использовано преобразование Фурье, реализованное в среде разработок LabView.

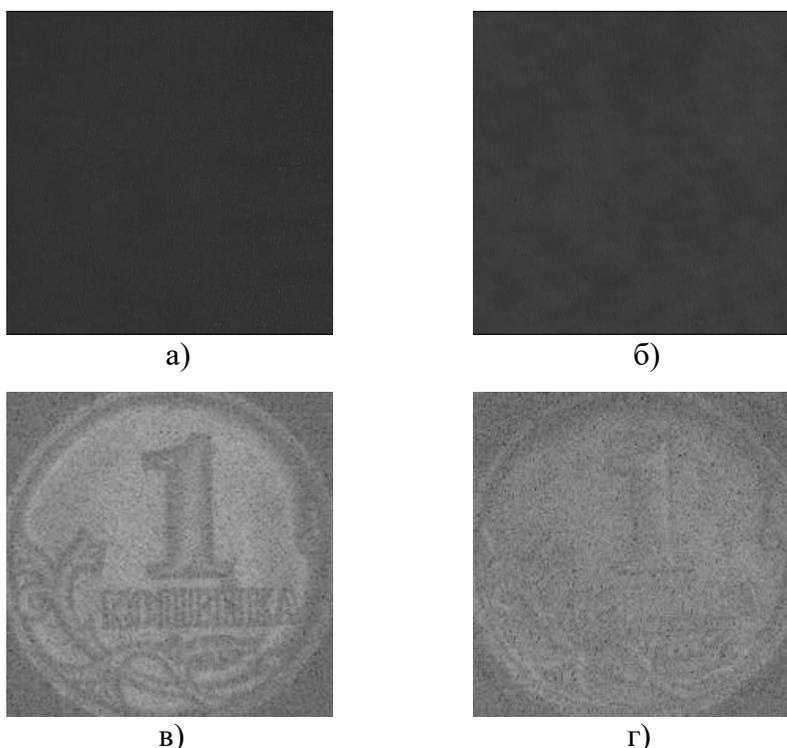


Рис. 3. Зарегистрированные цифровые голограммы (а, б) и восстановленные из них изображения (в, г) объектов соответственно. Для записи голограммы (а) использовалась предметная волна, отраженная от реального объекта, в то время как для записи голограммы (б) в качестве предметной волны была использована объектная волна, восстановленная из аналоговой отражательной голограммы

Сравнение полученных восстановленных изображений проведено путем вычисления корреляции Пирсона. Для представленных на рисунке 3 (в, г) изображений коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,3604$. Дальнейшие исследования аналого-цифрового преобразования информации, содержащейся в аналоговых отражательных голограммах, позволят восстанавливать из цифровых голограмм информацию с более высоким разрешением так, что описанный выше коэффициент корреляции будет достигать порядка 0,95–0,99.

Литература

- [1] Li X. et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation //Science advances. – 2016. – V. 2. – Is. 11. – P. e1601102.
- [2] Sukhavasi S.B. et al. CMOS image sensors in surveillance system applications //Sensors. – 2021. – V. 21. – Is. 2. – P. 488.
- [3] Rabosh E.V., et al. Three-dimensional simulation of volume pictorial hologram by photogrammetry method //Journal Scientific and Technical of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2019. – V. 124. – Is. 6. – P. 1013.

УДК 535.417

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЗНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ

Нигора Алимджановна Акбарова*, Мария Владимировна Шишова**

*Ташкентский государственный технический университет имени И.А. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты анализа метода с использованием преобразования Фурье над последовательностью голограмм, записанных в различные моменты времени. Показана возможность измерения деформаций композитного материала при нагреве маломощным лазерным излучением

Ключевые слова

Цифровая голографическая интерферометрия, преобразование Фурье, стеклопластик, металлическая пластина

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта А-3-110+А-3-112 Узбекистана

DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR THE STRAIN MEASUREMENTS IN DIFFERENT PERIODS OF TIME

Nigora A. Akbarova, Maria V. Shishova

*Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

**Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

Abstract

The paper presents the results of the analysis of the method using the Fourier transform over a sequence of holograms recorded at different points in time. Showing the possibility of measuring the deformation of a composite material when heated by low-power laser radiation

Keywords

Digital holographic interferometry, Fourier transform, fiberglass, metal plate

Acknowledgements

The work was supported by the grant A-3-110+A-3-112 of Uzbekistan

Введение

В настоящее время существенно вырос объем цифровой информации, и возникает потребность в разработке методов долгосрочного и компактного хранения данных. Применение голографических методов для решения этой проблемы позволит в перспективе существенно увеличить срок хранения информации при такой же или более высокой плотности хранения данных. В прошлых работах в качестве альтернативы классическому - двухлучевому методу записи голограмм, предложено использование методов компьютерного синтеза голографических структур.

Используемые методы и подходы

Запись цифровых голограмм впервые была предложена в [1], а числовая реконструкция была описана в работе [2]. Полностью цифровая запись на ПЗС камеру голограмм и их численное восстановление подробно описаны в [3]. Были разработаны алгоритмы синтеза интерферограмм на основе метода двойного Фурье преобразования. Две голограммы загружались в виде файлов изображений и представлялись в качестве массивов чисел. При этом разработанное программное обеспечение [4] позволяло фильтровать и форматировать изображения голограмм с помощью стандартных программ обработки изображений. Затем осуществлялась прямое двумерное преобразование Фурье.

Была предусмотрена возможность выделения определенной области пространственного спектра для осуществления фильтрации пространственных частот. Затем проводилась выделение мнимой и действительной части полученного массива и определение восстановления фазы. Полученный массив производился на экране компьютера. При этом была предусмотрена возможность фильтрации и форматирования полученного изображения. Таким образом, синтезированные интерферограммы представлялись в виде двумерных массивов чисел, предусмотрена возможность сохранения маски фильтрации пространственных частот и синтезируемой интерферограммы.

В качестве нагревающего лазера использовался DPSS лазер, излучающий на двух длинах волн, $\lambda_1 = 1,06$ мкм, 10Вт, и $\lambda_2 = 0,53$ мкм, 6Вт. Установка светофильтра позволяла выделять нужную длину волны. В области нагрева пятно греющего лазерного излучения имело Гауссово распределение интенсивности с радиусом на полувысоте 1 мм.

Для измерения тепловых деформаций методом двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии снималась голограмма не возмущенного объекта. Затем после включения греющего лазера снимались голограммы в разные промежутки времени после включения лазера. Полученные цифровые голограммы путем двойного Фурье преобразования сравнивались с голограммой не возмущенного объекта и были получены интерферограммы, из которых можно построить поле нормальных перемещений поверхности объекта с помощью программы развертывания фазы. Предварительные измерения показали, что, нагрев осуществляется в основном излучением с $\lambda_2 = 0,53$ мкм, а $\lambda_1 = 1,06$ мкм не поглощается композитом.

Далее пластина была проколота для образования дефекта (прорезь длиной 3 мм) и нагрев осуществлялся на боковом краю прорези. Пластина была придвинута к интерферометру, и видимая площадь составляла 5х3,5 см. Снимались голограммы при освещении под разными углами. Наличие дефекта искажало картину интерференционных полос.

Для сравнения картин деформации за счет нагрева в тех же экспериментальных условиях были получены интерферограммы деформаций засвеченной фотопластинки и интерферограммы деформаций области нагрева металлической пластины, а также интерферограммы деформаций при нагреве пластины из белой пластмассы, полученные в разное время после начала нагрева. Толщина пластины 3мм.

Результаты и заключение

Показана возможность измерения деформаций композитного материала при нагреве маломощным лазерным излучением. Область нагрева деформируется и при этом на периферийных областях проявляется структура, связанная внутренними напряжениями в исследуемом материале.

Литература

- [1] Goodman J.W., Lawrence R.W. Digital image formation from electronically detected holograms //Applied physics letters. – 1967. – V. 11. – Is. 3. – P. 77-79.
- [2] Kronrod M.A., Merzlyakov N.S., Yaroslavskii L.P. Reconstruction of a hologram with a computer //Soviet Physics Technical Physics. – 1972. – V. 17. – P. 333.
- [3] Schnars U., et al. Digital holography //Digital Holography and Wavefront Sensing. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. – P. 39-68.
- [4] Гусев М.Е., и др. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений //Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2. – №. 1. – С. 23–39.

УДК 535.14

ТЕХНИКА ОДНОКРАТНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ ИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Елизавета Георгиевна Циплакова*, Адриен Чопард, Николай Сергеевич Балбекин*, Ольга Алексеевна Смолянская*, Жан-Батист Перро**, Жан-Поль Гийе**, Патрик Моне**, Николай Владимирович Петров***

**Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

*** Университет Бордо, г. Бордо, Франция*

Аннотация

Рассматривается внедрение техники однократного сканирования при регистрации распределений интенсивности терагерцового (ТГц) дифракционного поля для задачи восстановления фазы. Показано, что метод однократного сканирования, реализующий сбор данных в режиме непрерывного перемещения приемника, значительно превосходит по скорости классический метод регистрации распределений интенсивности в статичном положении приемника. Метод однократного сканирования позволяет получить исчерпывающий объем данных и решить проблему необходимости подбора шага перемещения детектора на этапе эксперимента

Ключевые слова

Восстановление фазы, терагерцовое излучение, квантово-каскадный лазер, оптимизация, итерационный алгоритм, фазовая визуализация

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21–52–15035 НЦНИ_a

SINGLE-SCAN TECHNIQUE IN APPLICATION TO THE PHASE RETRIEVAL FROM THE INTENSITY DISTRIBUTIONS OF THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

Elizaveta G. Tsiplakova, Adrien Chopard, Nikolay S. Balbekin, Olga A. Smolyanskaya, Jean Baptiste Perraud, Jean-Paul Guillet, Patrick Mounaix, Nikolay V. Petrov

**ITMO University, St. Petersburg, Russia*

***University of Bordeaux, Bordeaux, France*

Abstract

The work considers a single scan technique implementation for intensity distributions recording of terahertz (THz) diffraction wavefield for phase retrieval task. It is shown that the single-scan data acquisition, implementing a continuous movement of the receiver, significantly faster than the classical method that assumes the registration of diffraction patterns at different distances from the object in the stationary position of the detector. The single-scan technique allows to obtain an exhaustive dataset and to eliminate the problem of preliminary adjustment of the detector translation step at the stage of experiment

Keywords

Phase retrieval, terahertz radiation, quantum cascade laser, optimization, iterative algorithm, phase imaging

Acknowledgements

Financial support from Russian Foundation for Basic Research under the grant № 21-52-15035 is gratefully acknowledged

Введение

Одним из основных приложений ТГц излучения, в силу его уникальных свойств, являются задачи визуализации [1]. Многие из работ направлены на получение фазового распределения поля, содержащего дополнительную информацию об объекте. Мощным инструментом для решения этой задачи стали итерационные алгоритмы восстановления фазы на непрерывных источниках излучения. Рассмотрено восстановление фазы ТГц волны

при помощи одного из наиболее популярных итерационных алгоритмов – SBMIR [2]. В качестве входных данных в SBMIR используются множественные распределения интенсивности дифракционного поля, зарегистрированные на различных расстояниях от объекта. При этом, необходимое для сходимости алгоритма количество распределений и шаг регистрации могут варьироваться в зависимости от условий эксперимента и не всегда могут быть подобраны оптимальным образом [3, 4]. В рамках данной работы мы представляем результаты внедрения техники однократного сканирования при регистрации данных, которая позволяет решить проблему поиска подходящего шага перемещения детектора, а также значительно ускорить процесс регистрации.

Используемые методы и подходы

В задаче восстановления фазы волны при помощи итерационного алгоритма SBMIR исследовалась схема на пропускание [5]. В качестве источника выступал ККЛ, а в качестве детектора – высокочувствительная камера на основе массива микроболометров, сопряженная с антеннами. Классический метод регистрации данных предполагает последовательное перемещение детектора с некоторым шагом в пространстве дифракционного поля объекта, а запись каждого отдельного распределения осуществляется в неподвижном положении детектора в течение некоторого времени для последующего усреднения. Использование высокочувствительной камеры совместно с излучением ККЛ обеспечило максимальное отношение сигнал/шум полученных зарегистрированных распределений интенсивности, что позволило исключить необходимость операции усреднения данных по каждому отдельно записываемому распределению.

Предложенная техника однократного сканирования реализует сбор данных при непрерывном перемещении детектора с постоянной скоростью. Длины волн ТГц излучения сильно превышают диапазон возможных смещений детектора, что позволяет реализовать регистрацию данных в режиме однократного сканирования. Скорость сбора данных при помощи классического и предложенного методов составила $3,45 \cdot 10^4$ и $1,92 \cdot 10^6$ пикс/с соответственно.

Результаты и заключение

В работе представлен способ регистрации ТГц данных для задачи восстановления фазы из множественных распределений интенсивности. Метод непрерывного сканирования обеспечивает быструю регистрацию расширенного набора ТГц данных, позволяя решить проблему поиска оптимального шага перемещения детектора на этапе проведения эксперимента.

Литература

- [1] Mittleman D.M. Twenty years of terahertz imaging // *Optics Express*. – 2018. – V. 26. – Is. 8. – P. 9417-9431.
- [2] Pedrini G., et al. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes // *Optics Letters*. – 2005. – V. 30. – Is. 8. – P. 833-835.
- [3] Petrov N.V., et al. The features of optimization of a phase retrieval technique in THz frequency range // *Proceedings SPIE*, – 2012. – V. 8413. – P. 387-391.
- [4] Chopard A., et al. Single-scan multiplane phase retrieval with a radiation of terahertz quantum cascade laser // *Applied Physics B*. – 2022. – V. 128. – Is. 3. – P. 1-9.
- [5] Petrov N.V., et al. Terahertz Multiple-Plane Phase Retrieval // *Imaging and Applied Optics Congress*. Washington, D.C.: OSA, – 2020. – P. HF4G.8.

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
XXXII МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКОЛЫ-СИМПОЗИУМА
ПО ГОЛОГРАФИИ, КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИКЕ И
ФОТОНИКЕ**

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Дизайн обложки

Вёрстка

Подписано к печати 07.10.2022

Заказ № 4679 от 10.10.2022

Тираж 50 экз.

Н.Ф. Гусарова

Н.А. Потехина

Н.С. Балбекин

Печатается в авторской редакции