

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535.34

**ГОРБАЧ**  
**Дмитрий Владиславович**

**ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И  
ВОЛНОВОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАУССОВЫХ И  
СИНГУЛЯРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ ИХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В РЕЗОНАНСНЫХ СРЕДАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – Оптика

Минск, 2018

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете.**

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -**

**ТОЛСТИК Алексей Леонидович,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой лазерной физики и  
спектроскопии Белорусского государственного  
университета.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**ЛЯЛИКОВ Александр Михайлович,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры информационных систем и  
технологий УО «Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы»;

**БУРОВ Леонид Иванович,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры общей физики  
Белорусского государственного университета.

**ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –**

**ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси».**

Защита состоится **25 мая 2018 года в 14.00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» *апреля* 2018 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования преобразования пространственно-временной структуры световых полей при нелинейно-оптических взаимодействиях являются одними из приоритетных направлений современной фотоники. Интерес к таким системам, работающим на принципе управления светом с помощью света, связан с многообразием возможных режимов взаимодействия и использованием преимуществ оптических методов обработки информации. Для определения принципов функционирования нелинейно-оптических систем большое внимание уделяется исследованиям распространения световых пучков в различных средах. Определены условия формирования и распространения световых пучков различных типов: пространственных солитонов, бесселевых и сингулярных световых пучков, пучков Матье, Эйри и т.д.

В настоящей работе рассматриваются процессы распространения и взаимодействия гауссовых и сингулярных световых пучков (оптических вихрей), отличительной особенностью которых является наличие топологического заряда, связанного с винтовой формой волнового фронта. Информация о величине топологического заряда светового пучка и принципах его преобразовании при распространении и взаимодействии с другими пучками позволяет решить ряд задач в различных областях физики, включая управление микрочастицами и биообъектами с использованием оптических пинцетов, реализацию оптических вычислений и квантовой телепортации, формирование волноводных структур, кодирование и передачу информации как по открытому каналу, так и через среду, улучшение параметров лазерной обработки материалов и повышение разрешения оптических систем для астрономических наблюдений.

Контролируемое преобразование пространственной и фазовой структуры световых пучков реализуется при многоволновых взаимодействиях в нелинейных средах, позволяющих осуществлять мультиплицирование фазы светового пучка. На этих принципах реализовано обращение волнового фронта с удвоением частоты и переводом изображения из ИК в видимую область спектра, а также измерены нелинейности пятого и более высокого порядков.

Дополнительные возможности увеличения объемов обрабатываемой информации и оптической памяти открывает применение в качестве информационного параметра состояния поляризации светового пучка. Поляризационная голографическая запись реализуется при взаимодействии ортогонально поляризованных пучков в средах, в которых проявляется зависимость коэффициента поглощения и (или) показателя преломления от поляризации падающего излучения, например, в используемых в работе растворах красителей.

Исследования формирования волноводных структур в нелинейной среде, преобразования поляризации и топологического заряда сингулярных световых пучков при четырех- и шестиволновом взаимодействии, перевод сингулярного пучка из ИК области спектра в видимую – все эти вопросы нашли отражение в настоящей диссертационной работе.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Представленные результаты исследований распространения и взаимодействия сингулярных и гауссовых световых пучков в резонансных средах получены при выполнении следующих научно-исследовательских тем:

«Разработка и оптимизация интерференционно-голографических методов формирования дифракционных оптических структур с заданными свойствами и создание на их основе элементов когерентного преобразования световых полей» государственной комплексной программы научных исследований «Фотоника» (2006-2010, гос. рег. № 20062738).

«Разработка методов формирования перестраиваемых оптических микроструктур и создание на их основе дифракционных и волноводных элементов для управления световыми полями» государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника» (2011 – 2013, гос. рег. № 20115594).

«Разработка методов формирования и диагностики микро- и наноструктурированных оптических элементов и создание фазово-поляризационных систем на основе фоторефрактивных и жидких кристаллов» государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника» (2014 – 2015, гос. рег. № 20142119).

Международных проектов БРФФИ совместно с Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова: №Ф10Р-070 «Нелинейное отражение, дифракция и взаимодействие гауссовых и сингулярных пучков» (2010 – 2012, гос. рег. № 20101911) и Ф12Р-075 «Распространение и нелинейное взаимодействие гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков в пространственно неоднородных средах» (2012 – 2014, гос. рег. № 20122478).

Молодежного гранта БРФФИ № Ф08М-158 "Многоволновые взаимодействия оптических вихревых пучков в растворах красителей" (2008-2010, гос. рег. № 20082053).

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы состояла в определении условий формирования светоиндуцированных волноводных структур в резонансных средах при проявлении тепловой нелинейности и установлении закономерностей преобразования поляризационной и топологической структуры светового пучка при реализации вырожденного и невырожденного по частоте многоволновых взаимодействий сингулярного и гауссовых световых пучков.

Для достижения указанной цели потребовалось решение следующих основных задач:

- определение спектральных и термооптических характеристик резонансной среды, обеспечивающих проявление нелинейностей высших порядков;
- разработка и создание фазовых голографических элементов с высокой лучевой стойкостью для формирования сингулярных световых пучков с различными топологическими зарядами (оптических вихрей);
- определение условий полного внутреннего отражения в среде с тепловой нелинейностью при светоиндуцированном изменении показателя преломления;
- определение условий формирования волноводных структур в нелинейной среде при распространении в ней сингулярного светового пучка;
- экспериментальная реализация преобразования величины топологического заряда сингулярного пучка при многоволновых взаимодействиях сингулярного и гауссовых световых пучков;
- экспериментальная реализация преобразования частоты сингулярного светового пучка при невырожденном многоволновом взаимодействии;
- экспериментальная реализация одновременного преобразования топологического заряда и поляризации сингулярного светового пучка при поляризационном многоволновом взаимодействии.

В качестве объекта исследования рассматривались этанольные растворы красителя родамин 6Ж и полиметинового красителя 3274U. Предметом исследования являлись нелинейно-оптические характеристики резонансных сред в условиях импульсного лазерного облучения, топологические, спектральные и поляризационные характеристики световых пучков при реализации многоволновых взаимодействий.

### **Научная новизна**

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- определены условия и экспериментально реализовано полное внутреннее отражение светового пучка в среде с тепловой

нелинейностью при светоиндуцированном изменении показателя преломления;

- экспериментально реализовано формирование динамических волноводных структур в нелинейной среде при распространении в ней сингулярного светового пучка;
- экспериментально реализовано преобразование величины топологического заряда сингулярного светового пучка при вырожденных по частоте многоволновых взаимодействиях сингулярного и гауссовых световых пучков в растворе красителя;
- экспериментально реализовано преобразование частоты сингулярного светового пучка из ИК области спектра в видимую при сохранении его топологического заряда, а также удвоение топологического заряда с одновременным частотным преобразованием при невырожденном по частоте многоволновом взаимодействии;
- экспериментально реализовано одновременное преобразование топологического заряда и поляризации сингулярного светового пучка при поляризационном многоволновом взаимодействии.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. При распространении импульсного светового пучка в среде с тепловой нелинейностью создается градиент показателя преломления, позволяющий реализовать эффект полного внутреннего отражения и переключение направления распространения пробного светового пучка, при этом использование сингулярного пучка позволяет сформировать динамический светоиндуцированный волноводный канал.

2. Запись сингулярных динамических голограмм в растворах красителей позволяет осуществить преобразование фазовых характеристик светового пучка, включая экспериментально реализованные эффекты удвоения топологического заряда, а также преобразования топологической структуры с одновременным изменением частоты.

3. Поляризационная запись сингулярных динамических голограмм в растворах красителей на основе схем многоволнового взаимодействия позволяет одновременно осуществлять преобразование как топологических, так и поляризационных характеристик световых пучков.

### **Личный вклад соискателя**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад соискателя в опубликованных работах. Основные работы соискателя написаны им в соавторстве с научным руководителем

доктором физико-математических наук, профессором А.Л. Толстиком, доктором физико-математических наук, профессором А.П. Сухоруковым, кандидатом физико-математических наук, доцентом О.Г. Романовым, доктором физико-математических наук, профессором В.В. Могильным, кандидатом физико-математических наук О. Ормачеа, кандидатом физико-математических наук Д.Н. Мармышем, аспирантами Л.А. Казаком и С.А. Назаровым. При этом соискатель непосредственно осуществлял постановку и проведение экспериментов, представленных в диссертации, а также принимал участие в анализе теоретических моделей изучаемых явлений, обсуждении полученных результатов. Вклад соавторов связан с определением методов исследований, обсуждением полученных результатов, разработкой теоретических моделей, проведением компьютерного моделирования. Руководителем А.Л. Толстиком определена цель работы и осуществлена постановка теоретических и экспериментальных задач. Кандидат физико-математических наук, доцент О.Г. Романов занимался разработкой теоретических моделей, проведением компьютерного моделирования изучаемых процессов. Профессор А.П. Сухоруков участвовал в постановке задач и обсуждении результатов, приведенных по второй главе диссертации. Профессор В.В. Могильный и Д.Н. Мармыш предоставили образцы и участвовали в записи транспарантов для преобразования гауссовых световых пучков в сингулярные. С.А. Назаров участвовал в проведении экспериментов по реализации поляризационного вырожденного по частоте многоволнового взаимодействия сингулярного и гауссовых световых пучков. Остальные соавторы проводили исследования, которые не связаны с темой диссертации.

### **Апробация результатов диссертации**

Изложенные в диссертационной работе результаты докладывались на следующих конференциях: International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. International Conference on Laser, Applications, and Technologies ICONO / LAT 2007 (Minsk, 2007), XII и XIII Всероссийских школах-семинарах «Физика и применение микроволн» («Волны-2009», «Волны-2011») (Москва: МГУ, 2009, 2011), XII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2010») (Москва: МГУ, 2010), International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences» (Minsk, 2010), International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. International Conference on Laser, Applications, and Technologies ICONO/LAT 2010 (Kazan, 2010), VIII Международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, 2010), VI, VII Международных конференциях «Фундаментальные проблемы оптики». (Санкт-Петербург, 2010, 2012), VIII Международной научно-технической конференции «Квантовая

электроника» (Минск, 2010), XIX Белорусско-Литовском семинаре «Лазеры и оптическая нелинейность» (Минск, 2011), International Workshop «Nonlinear Photonics: Theory, Materials, Applications» (St. Petersburg, 2011), III Конгрессе физиков Беларуси (Минск, 2011), 8-ой Международной научно-практической конференции «ГолоЭкспо–2011. Голография. Наука и практика» (Минск, 2011), IX Международной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, 2012), 16<sup>th</sup>, 17<sup>th</sup> International Conference – School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» (Minsk, 2012, 2014), International Workshop «Nonlinear Photonics: Theory, Materials, Applications» (St. Petersburg, 2015).

Результаты выполнения проекта БРФФИ №Ф10Р-070 «Нелинейное отражение, дифракция и взаимодействие гауссовых и сингулярных пучков» используются в учебном процессе при чтении курса лекций «Нелинейная оптика» для специализаций «Лазерная физика и спектроскопия», «Прикладная спектроскопия» на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ (Акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе от 15 марта 2012 г.).

Результаты исследования голографических методов управления топологическими, спектральными и поляризационными характеристиками оптических вихрей (сингулярных световых пучков) на основе записи сингулярных динамических голограмм, полученных при выполнении диссертационной работы, используются при чтении курса лекций по дисциплине «Оптическая обработка информации» для студентов 5 курса специальностей 1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность) и 1-31 04 01-06 Физика (физика наноматериалов и нанотехнологий) на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ (Акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе от 02 апреля 2018 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 научных работах, из которых: 9 – статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,5 авторских листа), 10 – статьи в сборниках трудов научных конференций, 8 – тезисы докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 113 страниц, в ней содержится 39 рисунков на 24



страницах, 2 таблицы, которые занимают 1 страницу, 1 приложение на 2 страницах. Библиографический список состоит из 294 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени. Приложение включает 2 акта об использовании результатов диссертации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**В первой главе** диссертации излагается краткий обзор работ по основным положениям и явлениям, формирующим объект и предмет исследования, а также предпосылки для постановки цели исследования.

В первом разделе дается краткая информация о спектроскопических характеристиках растворов красителей, которые могут быть применены для реализации нелинейно-оптических эффектов, проведен анализ условий, при которых светоиндуцированное изменение показателя преломления может принимать наибольшие значения, а также иметь нелинейную зависимость от интенсивности, характерную для оптических нелинейностей пятого и более высокого порядков.

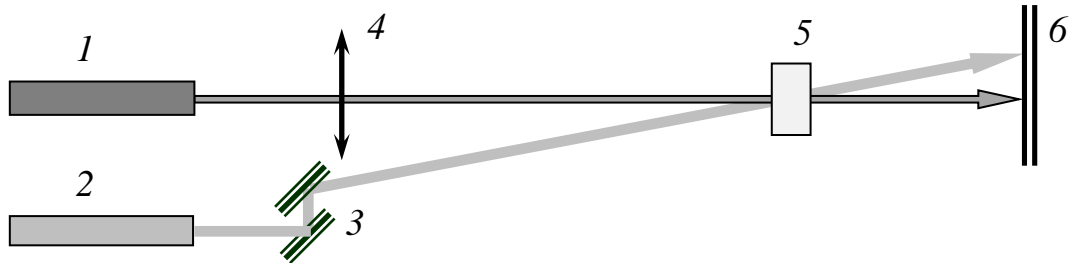
Второй раздел посвящен обзору работ по многоволновому взаимодействию световых волн, возможным вариантам его реализации и областям применения.

В третьем разделе приводится информация о сингулярных световых пучках, волновой фронт которых содержит винтовую дислокацию. Проанализирована проблема регистрации основной характеристики сингулярного светового пучка – его топологического заряда. Предложена схема определения топологического заряда для применения в проводимых экспериментальных исследованиях.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию особенностей двухволнового взаимодействия некогерентных световых пучков в резонансных средах.

В первом разделе рассматривается взаимодействие двух гауссовых пучков: мощного пучка накачки, создающего область светоиндуцированного изменения показателя преломления, и взаимодействующего с ним пробного пучка. Целью исследования являлось определение параметров среды, характеристик световых пучков и схемы взаимодействия, при которых возможна реализация полного внутреннего отражения светового пучка от светоиндуцированного градиента показателя преломления среды. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. В качестве пробного пучка использовалось непрерывное излучение гелий-неонового лазера на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм. Мощный световой импульс на длине волны  $\lambda = 1064$  нм генерировался лазером на иттрий-алюминиевом гранате. Лазер работал в режиме активной модуляции добротности, при этом длительность импульса генерации составила 20 нс,

расходимость лазерного излучения – 1,5 мрад, частота следования импульсов – 1-10 Гц. Система подвижных зеркал позволяла изменять угол между световыми пучками в диапазоне 10 – 100 мрад.



1 – He-Ne лазер, 2 – лазер на алюмоиттриевом гранате, 3 – система подвижных зеркал, 4 – длиннофокусная фокусирующая линза, 5 – кювета с нелинейной средой, 6 – экран  
Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки для исследования взаимодействия некогерентных световых пучков

В качестве среды с тепловой нелинейностью использовался этанольный раствор полиметинового красителя 3274U, поглощающего излучение на длине волны генерации импульсного лазера накачки ( $\lambda = 1064$  нм) и практически прозрачного в видимой области спектра. Длина кюветы с красителем в эксперименте составила 1 см, оптическая толщина среды –  $kL = 3.5$ . Результирующая картина взаимодействия регистрировалась на экране с помощью ПЗС камеры. Угол между пробным пучком и пучком накачки составлял 20 мрад, интенсивность пучка накачки изменялась путем использования сферических линз с разным фокусным расстоянием.

На рисунке 2 приведены типичные картины, получаемые при взаимодействии световых пучков в растворе красителя при различных интенсивностях мощного пучка:  $I = 100$  МВт/см<sup>2</sup> (рисунки а - д) и  $I = 400$  МВт/см<sup>2</sup> (рисунки е - к).

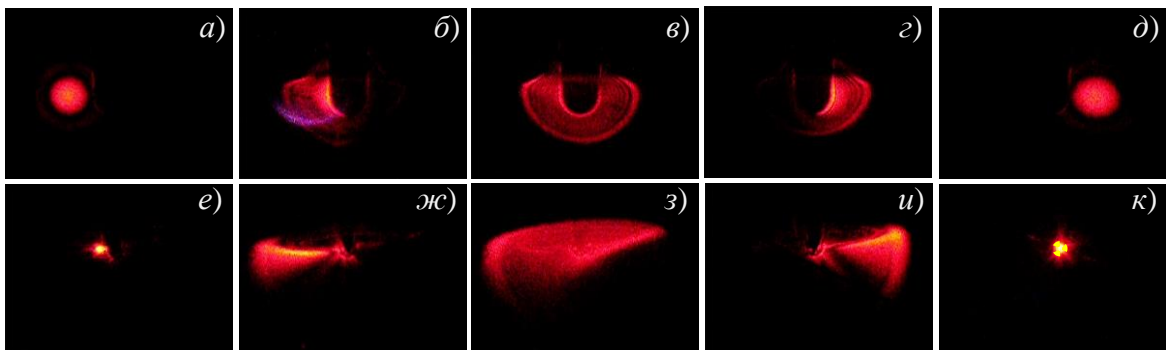
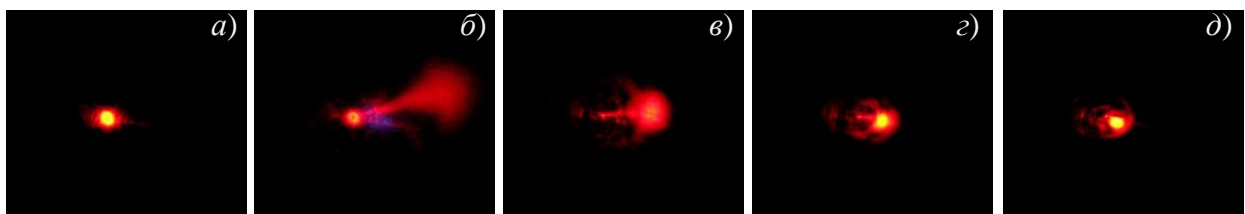


Рисунок 2. – Типичные картины, получаемые при взаимодействии световых пучков в растворе красителя при различных интенсивностях мощного пучка:  $I = 100$  МВт/см<sup>2</sup> (рисунки а - д) и  $I = 400$  МВт/см<sup>2</sup> (рисунки е - к)

Рисунки 2 *а, е* соответствуют начальному положению взаимодействующих пучков, когда они еще не пересекаются в нелинейной среде. При смещении пробного пучка в кювете с красителем по направлению к мощному пучку пробный пучок начинает отталкиваться (рисунки 2 *б, ж*). В наблюдаемом распределении интенсивности пробного пучка крайняя левая часть практически достигает на экране точки начального положения пучка накачки (рисунок 2 *б*), или даже смещается за него при большей плотности мощности (рисунок 2 *ж*), что свидетельствует об отражении части излучения пробного пучка. При дальнейшем смещении (рисунки 2 *в, з*) пучки полностью перекрываются, при этом пробный пучок на экране начинает размываться и «перетекать» из крайней левой точки на экране в крайнюю правую (рисунки 2 *г, и*). При большой плотности мощности накачки смещение происходит далеко за точку начального положения пробного пучка (рисунок 2 *и*). Такое распределение интенсивности показывает отражение от другой части сформированного градиента показателя преломления. При дальнейшем сканировании излучение пробного пучка начинает смещаться из крайнего правого положения к своему несмещенному положению, как в отсутствии мощного пучка, и наблюдается недеформированный пробный пучок (рисунки 2 *д, к*).

Для интенсивности мощного пучка  $I = 100 \text{ МВт/см}^2$  угол между пучками в эксперименте соответствовал критическому и наблюдалось только рассеяние интенсивности пробного пучка в область углов, соответствующих отражению. Для большей интенсивности  $I = 400 \text{ МВт/см}^2$  наблюдался перенос части интенсивности за линию направления распространения мощного пучка, таким образом наблюдалось частичное отражение пробного пучка. Для реализации полного отражения пробного светового пучка интенсивность была увеличена до  $I = 1,5 \text{ ГВт/см}^2$ , угол между взаимодействующими пучками уменьшен до  $\Theta = 10 \text{ мрад}$ . Как видно из рисунков 3 *б, в*) перенос большей части интенсивности пробного пучка в область углов, соответствующих отражению, осуществляется за времена порядка 50 мс.



**Рисунок 3. – Динамика трансформации пробного пучка, при отражении от мощного импульсного пучка накачки в различные времена наблюдения:  
 $t = 0$  (*а*), 30мс (*б*), 60мс (*в*), 120мс (*г*), 270мс (*д*)**

Анализ картин отражения светового пучка от светоиндуцированной области показал, что при работе с частотой повторения импульсов, компенсирующей процессы релаксации тепловой линзы, конвекционные токи

формируют тепловую «стенку» в растворе красителя.

Второй раздел посвящен изучению особенностей двухволнового взаимодействия гауссового и сингулярного световых пучков. Целью исследования являлось определение параметров среды, характеристик взаимодействующих пучков и схемы взаимодействия, при которых возможно создание динамического волновода на основе эффекта полного внутреннего отражения, рассмотренного в предыдущем разделе.

Для создания в нелинейной среде динамического волновода необходимо в поперечном сечении среды создать замкнутый контур изменения показателя преломления. Такой контур может быть создан при распространении через среду мощного сингулярного светового пучка, имеющего кольцевое распределение интенсивности. Для формирования в эксперименте такого пучка из излучения с гауссовым профилем специально разработан и изготовлен фазовый голографический транспарант, устойчивый к мощному лазерному излучению. Формирование волноводного канала в этанольном растворе красителя родамин 6Ж осуществлялось по экспериментальной схеме, аналогичной приведенной на рисунке 1, при соосном распространении мощного импульсного сингулярного пучка лазера на иттрий-алюминиевом гранате на длине волны 532 нм и непрерывного лазерного излучения гелий-неонового лазера, выступающего в качестве пробного пучка. Из рисунка 4 видно, что при увеличении интенсивности мощного пучка на входе в кювету с красителем до  $I = 70 \text{ МВт/см}^2$  размеры пробного светового пучка уменьшаются вдвое, что подтверждает формирование волноводного канала, захватывающего непрерывное излучение гелий-неонового лазера.



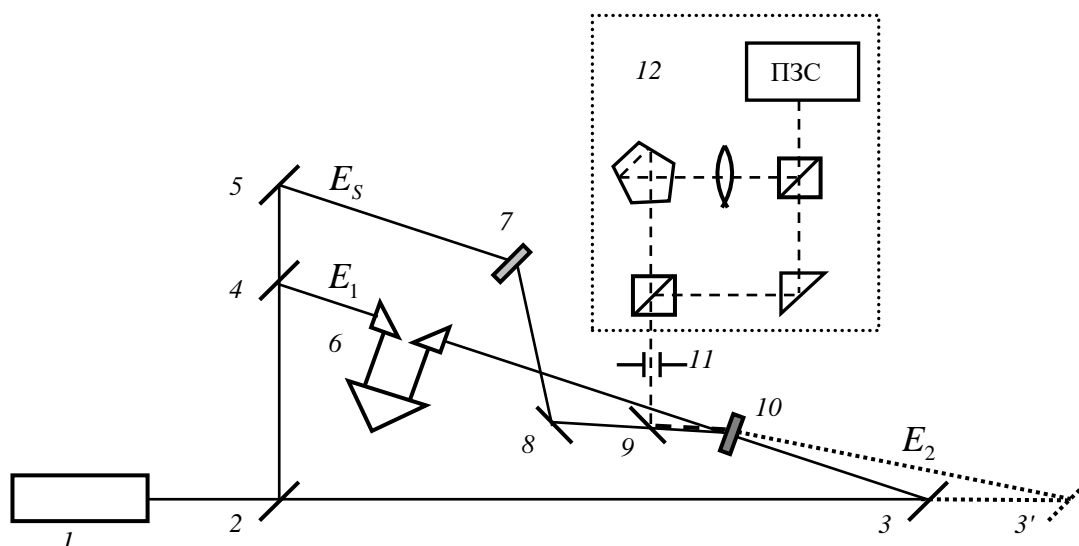
**Рисунок 4.** – Распределение интенсивности пробного пучка на выходе из нелинейной среды при интенсивности пучка накачки на входе в кювету  $I$ :  
*а) 0 МВт/см<sup>2</sup>, б) 40 МВт/см<sup>2</sup>, в) 70 МВт/см<sup>2</sup>*

**Третья глава** посвящена исследованию преобразования топологического заряда при многоволновых взаимодействиях гауссовых и сингулярных световых пучков в растворах красителей.

В первом разделе приведен анализ теоретических работ по вырожденному многоволновому взаимодействию применительно к

сингулярным световым пучком, позволяющий сделать вывод о возможности реализации в реальном времени различных математических операций с топологическим зарядом световых пучков: сложение и вычитание нескольких топологических зарядов, умножение заряда на целое число, в том числе отрицательное.

Во втором разделе приводятся параметры экспериментальной установки и условия реализации вырожденного по частоте многоволнового взаимодействия гауссовых и сингулярного световых пучков в этанольном растворе красителя родамин 6Ж (рисунок 5). Лазер на алюмоиттриевом гранате 1 работал в режиме генерации второй гармоники ( $\lambda=532$  нм). Опорная  $E_1$  и сигнальная  $E_S$  волны формировались зеркалами 2, 4, 5. Направление распространения считывающей волны  $E_2$  регулировалось с помощью подвижного зеркала 3 и определялось условием фазового синхронизма. Для согласования оптической длины пути сигнальной и опорной волн использовалась линия задержки 6. Для получения сигнального светового пучка с винтовой дислокацией волнового фронта использовались компьютерно-синтезированные транспаранты 7, записанные в слоях полиметилметакрилата, содержащего фенантренхинон, с дифракционной эффективностью 70% ( $\lambda=532$  нм). Сингулярный пучок направлялся в кювету с раствором красителя 10 под небольшим углом к опорной волне с помощью зеркала 8. Для отведения дифрагированного пучка в систему регистрации использовалось полупрозрачное зеркало 9 и диафрагма 11. Пространственные профили интенсивности световых пучков регистрировались с помощью ПЗС-камеры, размещенной на выходе интерферометра Маха-Цендера 12,



1 – лазер на алюмоиттриевом гранате; 2 – светоделитель; 3, 3', 4, 5, 8, 9 – зеркала;  
6 – линия задержки; 7 – транспарант; 10 – кювета с раствором красителя;  
11 – диафрагма; 12 – система регистрации

Рисунок 5. – Схема экспериментальной установки для реализации вырожденного по частоте многоволнового взаимодействия

позволяющего получать интерференционные картины для сигнального и дифрагированного световых пучков и идентифицировать их топологическую структуру. Расположение в одном из плеч интерферометра линзы приводит к формированию интерферограммы в виде спирали, количество рукавов которой пропорционально абсолютной величине топологического заряда оптического вихря, а направление вращения определяет его знак.

Экспериментально продемонстрировано осуществление инверсии знака топологического заряда светового пучка (рисунок 6 в, г), а также реализация двукратного увеличения топологического заряда (рисунок 7 в, г).

В третьем разделе приводятся результаты анализа теоретических работ по невырожденному по частоте многоволновому взаимодействию и показывается возможность осуществления одновременного преобразования топологического заряда светового пучка и преобразования его частоты.

Четвертый раздел посвящен экспериментальной реализации невырожденного по частоте многоволнового взаимодействия сингулярного и гауссовых световых пучков. Схема экспериментальной установки аналогична приведенной на рисунке 5. Лазер на алюмоиттриевом гранате 1 работал в режиме генерации основной частоты ( $\lambda = 1064$  нм) и второй гармоники ( $\lambda = 532$  нм). Для

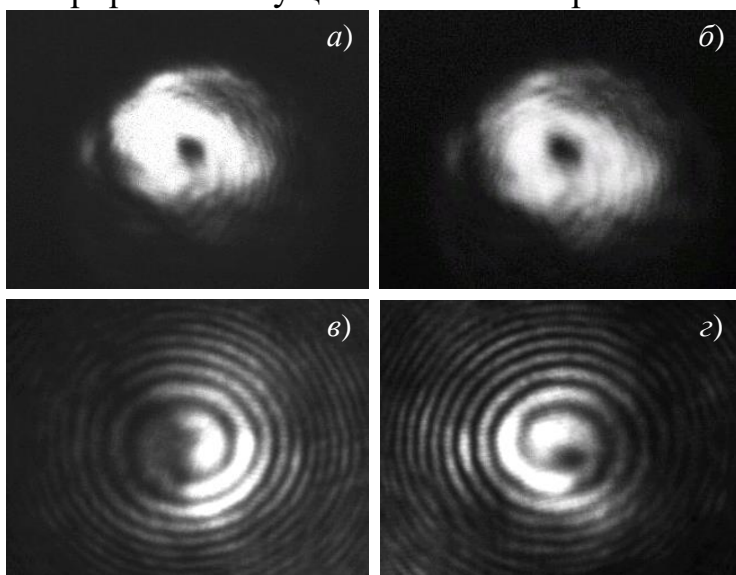


Рисунок 6. – Пространственные распределения интенсивности *a)*, *б)*, и интерферограммы *в)*, *г)*, сигнального и дифрагированных световых пучков при вырожденном четырехволновом взаимодействии, соответственно

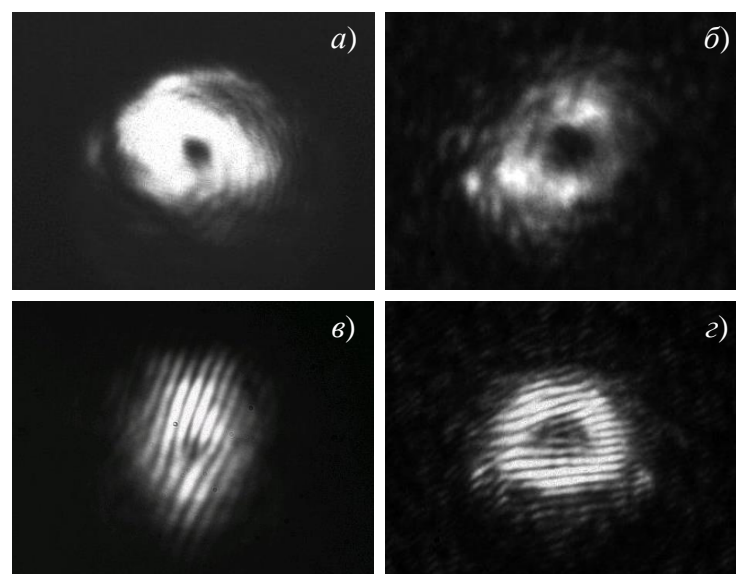
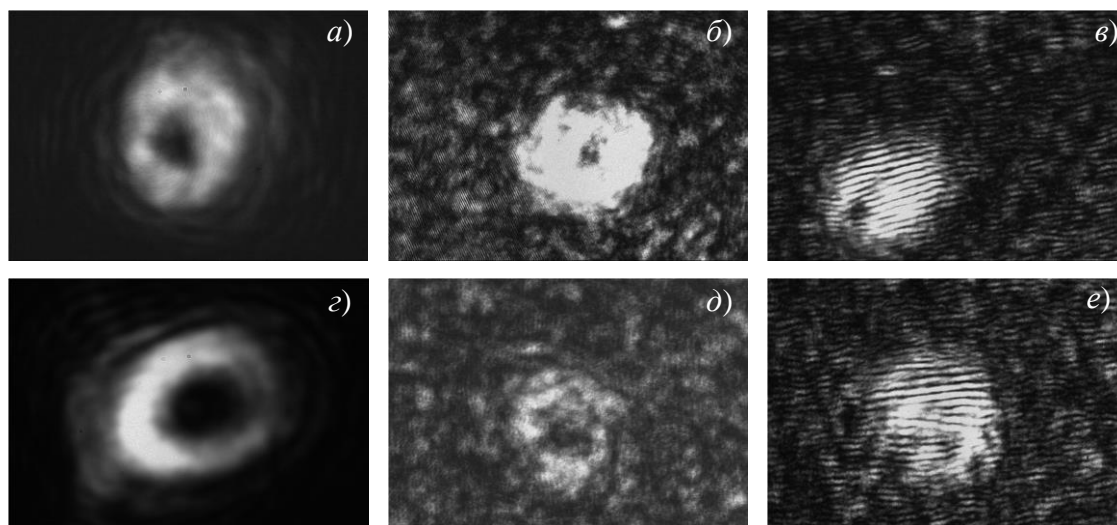


Рисунок 7. – Пространственные распределения интенсивности *a)*, *б)*, и интерферограммы *в)*, *г)*, сигнального и дифрагированных световых пучков при вырожденном шестиволновом взаимодействии, соответственно

разделения волн на разных частотах использовался спектроделитель 2, а в качестве нелинейной среды – этанольный раствор красителя 3274U, поглощающий излучение на длине волны 1064 нм, на которой и проходила запись динамических голограмм опорной  $E_1$  и сигнальной  $E_S$  волнами. Считывание динамической голограммы проводилось волной  $E_2$  на длине волны 532 нм, что позволило реализовать частотное преобразование оптических вихрей первого и второго порядков из ИК области спектра ( $\lambda = 1064$  нм) в видимую ( $\lambda = 532$  нм) при сохранении величины их топологических зарядов (рисунок 8).



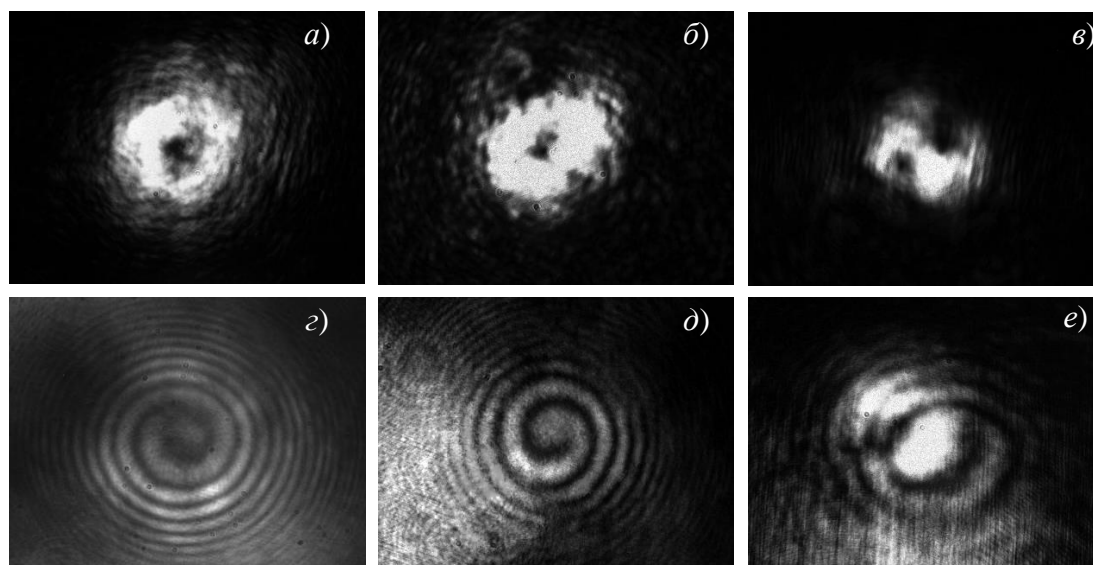
**Рисунок 8.** – Пространственные распределения интенсивности сигнального (*a, z*) и дифрагированного (*b, d*) световых пучков и интерференционные картины для дифрагированных пучков (*v, e*) с топологическим зарядом  $l = 1$  (*a – v*) и  $l = 2$  (*z – e*)

Переход к шестиволновому взаимодействию за счет изменения направления распространения считывающей волны (позиция зеркала 3' на рисунке 5) позволил реализовать удвоение топологического заряда с одновременным частотным преобразованием пучка (рисунок 9). Полученная дифрагированная волна имела топологический заряд, удвоенный по величине и обратный по знаку относительно сигнального пучка.

**Четвертая глава** посвящена исследованию поляризационной записи сингулярных динамических голограмм в растворе красителей.

В первом разделе приведены результаты феноменологического рассмотрения преобразования поляризации светового пучка при многоволновых взаимодействиях. Отмечается, что при реализации взаимодействия на решетках, записанных одинаково поляризованными опорной  $E_1$  и сигнальной  $E_S$  волнами, поляризация дифрагированной волны  $E_D$  как при четырех-, так и при шестиволновом взаимодействии определяется поляризацией считывающей волны  $E_2$ . В случае записи решеток ортогонально поляризованными волнами

при четырехволновом взаимодействии плоскость поляризации дифрагированной волны оказывается повернутой на  $90^\circ$  относительно считывающей, а при шестиволновом взаимодействии ориентации плоскостей поляризации дифрагированной и считывающей волн совпадают.

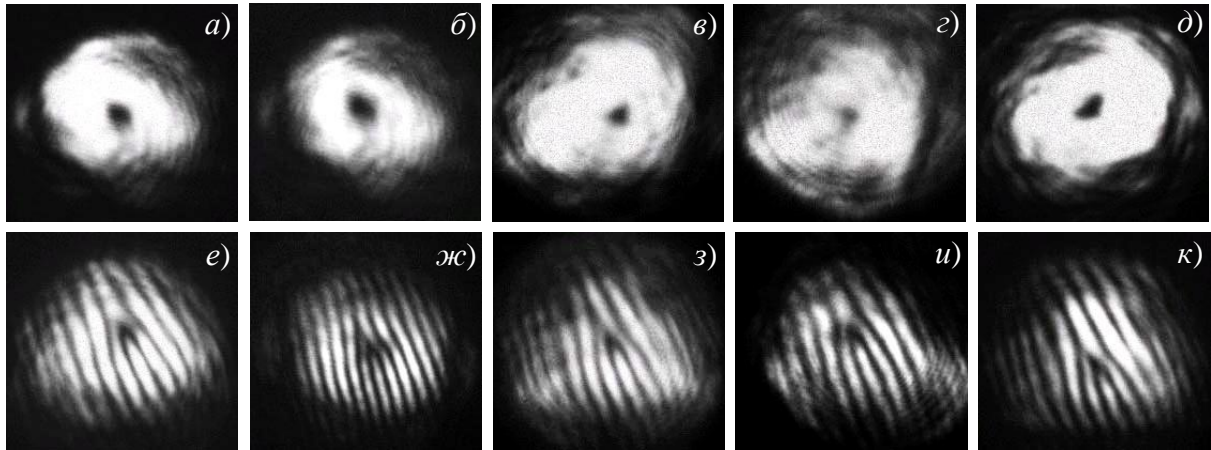


**Рисунок 9. – Пространственные распределения интенсивности сигнального светового пучка с топологическим зарядом  $l = 1$  (а) и дифрагированных пучков при четырех- (б) и шестиволновом (в) взаимодействии и соответствующие им интерференционные картины (г – е)**

Второй раздел посвящен экспериментальной реализации поляризационной записи сингулярных динамических голограмм в растворе красителя родамин 6Ж. Запись голограмм осуществлялась линейно поляризованными волнами. Для изменения ориентации плоскости поляризации взаимодействующих волн в схеме, приведенной на рисунке 5, поочередно, по ходу каждого из лучей вносилась полуволновая фазовая пластинка.

Экспериментально показано, что при поляризационных многоволновых взаимодействиях сингулярного и гауссовых световых пучков состояние поляризации дифрагированной волны зависит от взаимной ориентации плоскостей поляризации взаимодействующих волн, в то время как величина топологического заряда остается постоянной. На рисунке 10 приведены изображения пространственных распределений интенсивности и соответствующие интерферограммы для сигнального пучка (а, е) и дифрагированного пучка при идентичной ориентации поляризации взаимодействующих волн (б, ж), повернутой на  $90^\circ$  плоскости поляризации опорной (в, з), сигнальной (г, и) и считывающей (д, к) волны. При этом поляризация дифрагированной волны совпадала с поляризацией сигнальной волны, вносящей в записываемую голограмму топологический заряд, в случаях (б, з) и была ортогональна ей в случаях (в, д).





**Рисунок 10.** – Пространственные распределения интенсивности световых пучков, полученные при поляризационном вырожденном четырехволновом взаимодействии *a) – d)*, и соответствующие им интерферограммы *e) – k)*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Определены условия взаимодействия некогерентных гауссовых световых пучков в среде с тепловой нелинейностью, при которых имеет место эффект нелинейного отражения. Продемонстрирована преимущественная трансформация распределения интенсивности пробного пучка в область углов, отвечающих геометрическому отражению от пучка накачки. Показано, что при работе с частотой повторения импульсов, компенсирующей процессы релаксации тепловой линзы, конвекционные токи формируют тепловую «стенку» в растворе красителя.

Анализ взаимодействия гауссового и сингулярного световых пучков позволил определить условия, при которых имеет место режим волноводного распространения пробного светового пучка в области светоиндуцированного изменения показателя преломления, созданной мощным сингулярным пучком. Экспериментально продемонстрирована локализация интенсивности пробного пучка вдоль оси сформированного волновода при коллинеарном распространении пучков в этанольном растворе красителя родамин 6Ж. Для формирования сингулярных световых пучков высокой пиковой мощности с различными топологическими зарядами разработаны и созданы фазовые голографические транспаранты на основе полиметилметакрилата, активированного фенантрехиноном. [4, 5, 10–12, 16, 21, 22].

2. Проанализированы голографические методы управления топологическим зарядом оптических вихрей на основе сингулярных

динамических голограмм. Экспериментально продемонстрирована инверсия знака топологического заряда сингулярного светового пучка, а также реализация кратного увеличения топологического заряда при вырожденных по частоте многоволновых взаимодействиях в растворе красителя родамин 6Ж.

С использованием схемы невырожденного четырехволнового взаимодействия при записи пропускающих динамических голограмм в схеме попутного распространения опорного светового пучка и сигнального сингулярного пучка в этанольном растворе полиметинового красителя 3274U реализовано частотное преобразование оптических вихрей из ИК области спектра в видимую. При использовании схемы шестиволнового взаимодействия осуществлено удвоение топологического заряда с одновременным частотным преобразованием. [1 – 3, 6, 13 – 15, 17, 20, 23, 24].

3. Экспериментально проанализирована поляризационная запись сингулярных динамических голограмм. Показано, что при любой комбинации поляризаций взаимодействующих волн величина внесенного в сформированную динамическую голограмму топологического заряда, передаваемого дифрагированной волне, остается постоянной. Экспериментально установлены зависимости ориентации плоскости поляризации дифрагированного сингулярного пучка от поляризации взаимодействующих волн при вырожденных многоволновых взаимодействиях. [7 – 9, 18, 19, 25 – 27].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Диссертационная работа относится к области фундаментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с резонансными средами. Практическая значимость обусловлена использованием выявленных принципов преобразования поляризационной и фазовой структуры световых пучков посредством динамических голограмм в системах оптической обработки, преобразования и передачи информации.

Обнаруженные закономерности проявления полного внутреннего отражения при воздействии мощным импульсным излучением на среду с тепловой нелинейностью включены в лекционный курс «Нелинейная оптика» для студентов четвертого курса кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ. Установленные закономерности преобразования поляризационных, спектральных и топологических характеристик световых пучков при многоволновых взаимодействиях включены в лекционный курс «Оптическая обработка информации» для студентов пятого курса кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь

1. Gorbach, D.V. Transformation of topological structure of optical vortices upon frequency non-degenerate four-wave mixing / D.V. Gorbach, A.L. Tolstik, O.G. Romanov // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2009. – Vol.12, №1. – P.68-74.
2. Горбач, Д.В. Преобразование сингулярных световых пучков при невырожденном четырехволновом взаимодействии в растворах красителей / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2009. – Т. 73, №12. – С.1750-1754.
3. Романов, О.Г. Частотное преобразование оптических вихрей при невырожденном многоволновом взаимодействии в растворах красителей / О.Г. Романов, Д.В. Горбач, А.Л. Толстик // *Оптика и спектроскопия*. – 2010. – Т.108, №5. – С.812-817.
4. Нелинейное взаимодействие и отражение некогерентных световых пучков / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.П. Сухоруков, А.Л. Толстик // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2010. – Т.74, №12. – С.1706-1710.
5. Формирование динамических волноводных структур в средах с тепловой и резонансной нелинейностью / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.П. Сухоруков, А.Л. Толстик // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2011. – Т.75, №12. – С.1733-1736.
6. Частотное преобразование световых полей методами динамической голографии / А.Л. Толстик, Д.В. Горбач, О. Ормачеа, О.Г. Романов // *Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер.1*. – 2011. – №3. – С.17-25.
7. Горбач, Д.В. Вырожденное поляризационное многоволновое взаимодействие световых пучков в растворе красителя родамин 6Ж / Д.В. Горбач, С.А. Назаров, А.Л. Толстик // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2013. – Т.77, №12. – С.1719–1722.
8. Романов, О.Г. Преобразование оптических вихрей поляризационными динамическим голограммами / О.Г. Романов, Д.В. Горбач, А.Л. Толстик // *Оптика и спектроскопия*. – 2013. – Т.115, №3. – С. 383-388.
9. Polarization transformation of singular light beams upon four- and six-wave mixing / D.V. Gorbach, S.A. Nazarov, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2015. – Vol.18, №2. – P.149-156.

**Статьи в сборниках трудов научных конференций**

10. Gorbach, D.V. Interaction and reflection of incoherent beams in media with thermal nonlinearity / D.V. Gorbach, A.P. Sukhorukov, A.L. Tolstik // Proc. of SPIE 6725, ICONO 2007: Nonlinear Space-Time Dynamics. – 2007. – Vol.6725. – P. 672515-1 – 672515-6.

11. Романов, О.Г. Распространение и взаимодействие сингулярных световых пучков в резонансных средах / О.Г. Романов, Д.В. Горбач, А.Л. Толстик // Физика и применение микроволн («Волны-2009») : сборник трудов XII Всероссийской школы-семинара, Москва: МГУ, 25-30 мая 2009г.: в 7ч. [Электронный ресурс]. – Москва, 2009. – Ч. 6. – С.11–13. – Режим доступа : <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/old/thesis09/Section6.pdf>. – Дата доступа : 12.04.2018.

12. Голографический транспарант для создания оптических вихрей / Д.В. Горбач, А.Л. Толстик, В.В. Могильный, Д.Н. Мармыш // Физика и применение микроволн («Волны-2009») : сборник трудов XII Всероссийской школы-семинара, Москва: МГУ, 25-30 мая 2009г.: в 7ч. [Электронный ресурс]. – Москва, 2009. – Ч. 6. – С.14–16. – Режим доступа : <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/old/thesis09/Section6.pdf>. – Дата доступа : 12.04.2018.

13. Romanov, O.G. Transformation of topological structure of singular light beams by multiwave mixing in resonant media / O.G. Romanov, A.L. Tolstik, D.V. Gorbach // Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences : proceedings of the International Conference, Minsk, 15-19 June, 2010 :in 2 vol. – Minsk, 2010. – Vol. 2. – P.140-148.

14. Формирование, суперпозиция и нелинейное взаимодействие вихревых оптических пучков / А.Л. Толстик, О.Г. Романов, Д.В. Горбач, Л.А. Казак // Лазерная физика и оптические технологии : сборник научных трудов VIII Международной научной конференции, Минск, 27-30 сент., 2010г. : в 2 т. – Минск, 2010. – Т. 2. – С.174-177.

15. Горбач, Д.В. Преобразование оптических вихрей тонкими и объемными динамическими голограммами / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // Фундаментальные проблемы оптики – 2010 : Сборник трудов Международной конференции и семинаров, Санкт-Петербург, 18-22 окт., 2010 г. : в 3 т. / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – Санкт-Петербург, 2010. – Т.1. – С.126-128.

16. Отражение световых пучков в средах с тепловой нелинейностью / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.П. Сухоруков, А.Л. Толстик // Фундаментальные проблемы оптики – 2010 : Сборник трудов Международной конференции и

семинаров, Санкт-Петербург, 18-22 окт., 2010 г. : в 3 т. / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – Санкт-Петербург, 2010. – Т.1. – С.314-316.

17. Горбач, Д.В. Преобразование оптических вихрей при многоволновых взаимодействиях / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // «ГолоЭкспо–2011. Голография. Наука и практика» : сб. науч. тр. 8 Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 29 сент.-1 окт. 2011 г. – Минск, 2011. – С.418-422.

18. Горбач, Д.В. Преобразование оптических вихрей поляризационными динамическими голограммами / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // *Фундаментальные проблемы оптики – 2012* : Сборник трудов Международной конференции, Санкт-Петербург, 15-19 окт., 2012 г. / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – Санкт-Петербург, 2012. – С.23-26.

19. Polarization multiwave interaction of Gaussian and singular light beams / D.V. Gorbach, S.A. Nazarov, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // *Nonlinear Photonics: Theory, Materials, Applications : Technical Digest of International Workshop, Saint-Petersburg, June 29 - July 02, 2015.* – Saint-Petersburg, 2015. – P. 60-62.

### **Тезисы докладов конференций**

20. Gorbach, D.V. Multiwave mixing of singular light beams in dye solutions / D.V. Gorbach, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // *ICONO/LAT 2010. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. International Conference on Laser, Applications, and Technologies : Conference Program, Kazan, 23-27 Aug. 2010.* – Kazan, 2010. – P.112.

21. Динамика отражения некогерентных световых пучков в средах с тепловой нелинейностью / Д.В.Горбач, О.Г.Романов, А.П. Сухоруков, А.Л. Толстик // *Квантовая электроника : Материалы VIII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 22-25 нояб 2010г.* / Минск: Изд. центр БГУ; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С.31.

22. Горбач, Д.В. Нелинейное взаимодействие гауссовых и сингулярных световых пучков в растворах красителей / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // *Лазеры и оптическая нелинейность : Программа и аннотации XIX Белорусско-Литовского семинара, Минск, 16-18 мая 2011г.* – Минск, 2011. – С.16.

23. Gorbach, D.V. Dynamic holography of singular light beams / D.V. Gorbach, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // *Nonlinear Photonics: Theory, Materials, Applications : Book of Abstracts of International Workshop, Saint-Petersburg, 24-26 Aug. 2011.* – Saint-Petersburg, 2011. – P.32.

24. Толстик, А.Л. Преобразования сингулярных световых пучков при многоволновых взаимодействиях / А.Л. Толстик, О.Г. Романов, Д.В. Горбач // III Конгресс физиков Беларуси : Сборник тезисов и программа, Минск, 25-27 сент. 2011г. – Минск, 2011. – С.12.

25. Горбач, Д.В. Поляризационная запись сингулярных динамических голограмм в растворах красителей / Д.В. Горбач, О.Г. Романов, А.Л. Толстик // Лазерная физика и оптические технологии : сборник тезисов IX международной научной конференции, Гродно, 30 мая – 2 июня 2012г.: в 2 ч. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: С.А. Маскевич (гл. ред.), С.С.Ануфрик (зам.гл.ред) [и др.]. – Гродно, 2012. –Ч.2.– С. 136.

26. Gorbach, D.V. Polarization multiwave mixing of Gaussian and singular light beams in dye solutions / D.V. Gorbach, O.G. Romanov, A.L.Tolstik // Foundations & Advances in Nonlinear Science (16-th International Conference-School, September 24-28, 2012, Minsk, Belarus) and Advances in Nonlinear Photonics (International Symposium, September 24-26, 2012, Minsk, Belarus) : Programme and Book of abstracts. – Minsk, 2012. – P.39.

27. Polarized interaction of singular and Gaussian light beams in resonance media / D.V. Gorbach, S.A. Nazarov, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // 17-th International Conference – School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and 2-nd International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics» : Programme & Book of Abstracts, Minsk, September 29 - October 3, 2014. – Saint-Petersburg, 2014. – P. 41.

**Горбач Дзмітрый Уладзіслававіч**

**Фазава-палярызацыйнае пераўтварэнне і хваляводнае распаўсюджванне гауссавых і сінгулярных светлавых пучкоў пры іх узаемадзеянні ў рэзанансных асяроддзях**

Ключавыя словы: поўнае ўнутранае адбіццё, сінгулярны светлавы пучок, тапалагічны зарад, шматхвалявое ўзаемадзеянне, палярызацыйная дынамічная галаграма.

Мэта работы: распрацоўка метаду і вызначэнне ўмоў фармавання светлаіндукаваных хваляводных каналаў і выяўленне залежнасцяў пераўтварэння тапалагічнай, спектральнай і палярызацыйнай структуры светлага пучка пры шматхвалевых узаемадзеяннях сінгулярнага і гаусавых светлавых пучкоў у рэзанансных асяроддзях.

Метады даследвання: аналіз прасторавага размеркавання інтэнсіўнасці, велічыні тапалагічнага зарада, стану палярызацыі светлавых пучкоў.

Скарыстаная апаратура: крыніцы бесперапыннага і імпульснага лазернага выпраменьвання, вымяральнікі магутнасці лазернага выпраменьвання, ПЗС-камеры, персанальныя кампутары.

Прадэманстравана магчымасць поўнага ўнутранага адбіцця пробнага пучка ад градыенту паказчыка пераламлення, сфармаванага пучком накачкі, вызначаныя ўмовы рэалізацыі хваляводнага распаўсюджвання светлага пучка. У схемах выраджанага і нявыраджанага па частаце шматхвалевага ўзаемадзеяння сінгулярнага і гаусавых светлавых пучкоў эксперыментальна рэалізаваная інверсія знака тапалагічнага зарада з захаваннем або падваеннем яго велічыні, а таксама частотнае пераўтварэнне аптычных віхур. Паказана, што пры любой камбінацыі палярызацый ўзаемадзеяльных хваляў пры палярызацыйным запісе дынамічных галаграм велічыня ўнесенага ў сфармаваную галаграму тапалагічнага зарада, перададзенага дыфрагаванай хвалі, застаецца пастаяннай.

Праца належыць да вобласці фундаментальных даследаванняў узаемадзеяння лазернага выпраменьвання з рэзананснымі асяроддзямі. Атрыманыя вынікі з'яўляюцца новымі і тлумачаць заканамернасці ўзаемадзеяння светлавых пучкоў у растворах фарбавальнікаў, могуць знайсці прымяненне пры вырашэнні разнастайных задач стварэння сістэм аптычнага кіравання светлавымі пучкамі, атрымання пучкоў з зададзенымі фазавымі характарыстыкамі, аптычнай апрацоўкі інфармацыі.

**Горбач Дмитрий Владиславович**

**Фазово-поляризационное преобразование и волноводное распространение гауссовых и сингулярных световых пучков при их взаимодействии в резонансных средах**

Ключевые слова: полное внутреннее отражение, сингулярный световой пучок, топологический заряд, многоволновое взаимодействие, поляризационная динамическая голограмма.

Цель работы: разработка метода и определение условий формирования светоиндуцированных волноводных каналов и установление зависимостей преобразования топологической, спектральной и поляризационной структуры светового пучка при многоволновых взаимодействиях сингулярного и гауссовых световых пучков в резонансных средах.

Методы исследования: анализ пространственного распределения интенсивности, величины топологического заряда, состояния поляризации световых пучков.

Использованная аппаратура: источники непрерывного и импульсного лазерного излучения, измерители мощности лазерного излучения, ПЗС-камеры, персональные компьютеры.

Продемонстрирована возможность полного внутреннего отражения пробного пучка от градиента показателя преломления, сформированного пучком накачки, определены условия реализации волноводного распространения светового пучка. В схемах вырожденного и невырожденного по частоте многоволнового взаимодействия сингулярного и гауссовых световых пучков экспериментально реализована инверсия знака топологического заряда с сохранением либо удвоением его величины, а также частотное преобразование оптических вихрей. Показано, что при любой комбинации поляризаций взаимодействующих волн при поляризационной записи динамических голограмм величина внесенного в сформированную голограмму топологического заряда, передаваемого дифрагированной волне, остается постоянной.

Работа относится к области фундаментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с резонансными средами. Полученные результаты являются новыми и проясняют закономерности взаимодействия световых пучков в растворах красителей, могут найти применение при решении разнообразных задач создания систем оптического управления световыми пучками, получения пучков с заданными фазовыми характеристиками, оптической обработки информации.



## SUMMARY

**Gorbach Dmitry Vladislavovich**

**Phase-polarization transformation and waveguide propagation of Gaussian and singular light beams during their interaction in resonant media**

Key words: total internal reflection, singular light beam, topological charge, multiwave mixing, polarization dynamic hologram.

The purpose of research: development of the method and determination of the conditions for the formation of light-induced waveguide channels and determination of the dependence of the transformation of the topological, spectral and polarization structure of the light beam at multiwave interactions of singular and Gaussian light beams in resonant media.

Research methods: analysis of spatial distribution of intensity, value of topological charge, polarization state of light beams.

Used equipment: sources of continuous and pulsed laser radiation, laser radiation power meters, CCD cameras, personal computers.

The possibility of total internal reflection of the probe beam from the gradient of the refractive index formed by the pumping beam is demonstrated, and conditions for the realization of the waveguide propagation of the light beam are determined. In the schemes of a degenerate and non-degenerate multi-wave interaction of singular and Gaussian light beams, the inversion of the sign of the topological charge with saving or doubling of its value as well as frequency conversion of optical vortices are experimentally realized. It is shown that for any combination of polarizations of interacting waves during the polarization recording of dynamic holograms, the value of the topological charge transferred to the generated hologram and transmitted to the diffracted wave remains constant.

The work relates to the field of fundamental research on the interaction of laser radiation with resonant media. The obtained results are new and clarify the laws of interaction of light beams in dye solutions, can find application in solving various problems of creating of systems of optical control of light beams, obtaining beams with given phase characteristics, and optical data processing.