

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Объект авторского права**

**УДК 532.783; 535.394, 421, 326; 681.7.068.4; 535.4**

**МЕЛЬНИКОВА**

**Елена Александровна**

**ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ  
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – Оптика

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

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

Официальные оппоненты: **СЕМЧЕНКО Игорь Валентинович**,  
член-корреспондент НАН Беларуси,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заместитель генерального директора по научной  
деятельности Государственного научно-  
производственного объединения «Оптика,  
оптоэлектроника и лазерная техника»  
НАН Беларуси;  
**МАЛЯРЕВИЧ Александр Михайлович**,  
член-корреспондент НАН Беларуси,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Лазерная техника и  
технология» приборостроительного факультета  
Белорусского национального технического  
университета;  
**ХИЛО Петр Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры общей физики  
УО «Гомельский государственный университет  
имени П.О.Сухого»

Оппонирующая организация – **ГНУ «Институт физики  
имени Б.И. Степанова НАН Беларуси».**

Защита состоится 3 ноября 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-57-09; e-mail: romanov@bsu.by.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «28» сентября 2023 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат физико-математических наук доцент

О.Г. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

Среди электрооптических функциональных материалов, перспективных для создания устройств управления световыми пучками, на сегодняшний день лидирующее место занимают жидкие кристаллы (ЖК). Уникальные физические характеристики и возможность эффективного управления посредством электрических полей предопределили широкое практическое их использование в приложениях современной фотоники. Особенностью ЖК является высокая величина двулучепреломления, а также возможность ее управления низкими рабочими напряжениями (порядка нескольких вольт). Разработаны уникальные технологии, позволяющие создавать тонкопленочные устройства (толщина ЖК слоя 5–100 мкм) большой площадью ( $\sim \text{м}^2$ ). ЖК-элементы применяются в акустике, интегральной и адаптивной оптике, динамической голографии, инфракрасной и лазерной технике, в области телекоммуникаций и оптоэлектронных нейронных систем, используются в устройствах записи, отображения, обработки и хранения данных. Возможность задания начальной микроструктурированной ориентации директора ЖК с использованием фотоориентирующих полимерных материалов, позволила открыть новое направление электрически управляемых фотонных ЖК устройств, позволяющих реализовать поляризационно-фазовое управление лазерным излучением, формирование пространственно структурированного света и возбуждение волноводного режима его распространения. Ряд ЖК элементов, такие как ЖК коаксиальные оптические аттенюаторы, контроллеры поляризации и фазовые пластины уже представлены на современном рынке. Для решения разнообразных задач современной фотоники, включая оптическое манипулирование микрообъектами, передачу, кодирование и защиту информации актуальной остается задача поиска новых схемных решений 2D микроструктурированных ЖК элементов с расширенными функциональными возможностями.

Диссертационная работа посвящена разработке новых методов фазово-поляризационного преобразования световых полей на основе микроструктурированных нематических ЖК слоев с целью создания на их основе жидкокристаллических элементов, позволяющих реализовать электрически управляемые функции поляризационного разделения / переключения и волноводного распространения лазерного излучения, а также формирования сингулярных пучков с заданной векторной и фазовой топологией волнового фронта.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы (п.7.1. Взаимодействие лазерного излучения с различными средами и объектами, развитие физических основ создания новых лазерных технологий и техники); фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011-2015 годы (раздел 6, подразделы 6.1. Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с неорганическими и органическими веществами в разных фазах. 6.2. Новые оптические, волоконно-оптические и нелинейно-оптические компоненты, материалы и покрытия; раздел 12, подраздел 12.3. Квантовые технологии на атомно-молекулярном, субатомном и фотонном уровнях); научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы (6. Электроника и фотоника; 12. Междисциплинарные исследования); научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы (пункт 4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы (лазерные, оптические технологии; фотоника).

Основные результаты диссертационной работы были получены при выполнении заданий в рамках Государственных программ научных исследований, проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, заданий Государственных научно-технических программ и хозяйственного договора:

ГПНИ «Конвергенция», задание 3.01.03 «Разработка методов и технологии создания анизотропных жидкокристаллических фотонных структур и оптимизация их оптических и оптоэлектронных свойств для квантово-оптических приложений», № ГР 20115403, 2006–2010; ГПНИ «Фотоника», задание 1.09 «Разработка и оптимизация интерференционно-голографических методов формирования дифракционных оптических структур с заданными свойствами и создание на их основе элементов когерентного преобразования световых полей», № ГР 20062738, № ГР 20061488, 2006–2010; ГПНИ «Фотоника», задание 2.13 «Развитие физических основ и разработка эффективных лимитеров лазерного излучения на основе новых полиметиновых красителей», № ГР 20063137, 2006–2010; ГПНИ «Конвергенция», задание 3.01.03 «Разработка методов и технологии создания анизотропных жидкокристаллических фотонных структур и оптимизация их оптических и оптоэлектронных свойств для квантово-оптических приложений», № ГР 20115403, 2011–2015; ГПНИ «Электроника и фотоника»,

задание 2.2.09 «Разработка методов формирования перестраиваемых оптических микроструктур и создание на их основе дифракционных и волноводных элементов для управления световыми полями», № ГР 20115594, 2011–2013; ГПНИ «Электроника и фотоника», задание 2.2.18 «Разработка методов формирования и диагностики микро- и наноструктурированных оптических элементов и создание фазово-поляризационных систем на основе фоторефрактивных и жидких кристаллов», № ГР 20142119, 2014–2015; ГПНИ «Конвергенция», задание 3.03.5 «Разработка материалов и технологий создания микроструктурированных жидкокристаллических элементов для фотонных приложений», № ГР 20161428, 2016–2020; ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 1.2.01 «Разработка методов создания, контроля и диагностики оптических микро- и наноструктур и формирование на их основе световых пучков с заданной поляризационно-фазовой структурой», № ГР 20162087, 2016–2020; ГПНИ «Конвергенция», задание 3.02.5 «Разработка инновационных материалов и технологий получения многомерных фотонных структур для создания прототипов сенсорных и информационно-аналитических устройств», № ГР20211795, 2021-2025; ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 1.14 «Разработка микро- и наноструктурированных, поверхностных, фазовых и дифракционных оптических элементов для управления световыми полями, методов их контроля и диагностики», № ГР № 20212071, 2021-2025;

договор с БРФФИ № Ф04П-083 «Нелинейно-оптические взаимодействия, структуры и солитоны в средах с нелокальным откликом», № ГР 20042563, 2004–2006; договор с БРФФИ №Ф06Р-200 «Формирование нелинейного отклика при распространении и взаимодействии световых пучков в кристаллах семейства силленитов», № ГР 20063509, 2006-2008; договор с БРФФИ № Ф10МС-027 «Управление световыми полями на основе периодических и аперидических жидкокристаллических дифракционных волноводных структур», № ГР 20101911, 2010–2012; договор с БРФФИ № Ф14Р-168 «Распространение и взаимодействие световых пучков в неоднородных средах с фоторефракцией», № ГР 20142918, 2014–2016; договор с БРФФИ № Ф19МЛДГ-006 «Дизайн и разработка «вихревых» дифракционных оптических элементов на тонких слоях азополимеров для биомедицины», № ГР 20192198, 2019–2021;

ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Научно-учебное оборудование»: задание 20 «Разработать и изготовить научно-учебный лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанофотоники», № ГР 20141117, 2014–2015, задание 24 «Разработать и изготовить научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами», № ГР 20164580, 2016–2019;

договор с ЗАО «Голографическая индустрия» № 03921 на выполнение НИР «Определение межслойной азимутальной энергии сцепления репликационный лак – полимеризуемый жидкий кристалл», 2018–2019.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель работы заключается в разработке новых методов фазово-поляризационного преобразования световых полей на основе электрически управляемых микроструктурированных жидкокристаллических элементов, включающих дифракционные и волноводные структуры, q - пластинки, позволяющие реализовать функции оптических ограничителей, поляризационных делителей, мультиплексоров, микросканеров и создавать световые пучки с заданной фазово-поляризационной структурой.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) разработать технологии изготовления микроструктурированных элементов с двумерной и одномерной модуляцией оптической анизотропии;

2) создать образцы электрически управляемых ЖК элементов, функционирующих на эффекте «гость – хозяин», а также микроструктурированных элементов с начальной одномерной и двумерной модуляцией оптической анизотропии;

3) разработать схемное решение ограничения мощности лазерного излучения на длине волны второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате ( $\lambda = 532$  нм) на основе композита «нематический жидкий кристалл-полиметиновый краситель» и реализовать на его основе электрически управляемый лимитер оптического излучения;

4) реализовать электрическое управление дифракционной эффективностью динамических голограмм в схеме четырехволнового взаимодействия в функциональном композите «нематический жидкий кристалл - краситель»;

5) проанализировать условия реализации эффекта полного внутреннего отражения на электрически контролируемой рефрактивной границе, созданной двудоменной ортогональной ориентацией директора в планарном слое нематического ЖК и реализовать управление направлением распространения линейно поляризованного лазерного излучения;

6) провести экспериментальные и теоретические исследования условий возбуждения волноводного режима распространения поляризованного оптического излучения в электрически управляемых ЖК волноводах;

7) определить условия возбуждения оптических солитонов в планарно ориентированных слоях жидкого кристалла, а также электрического переключения режима оптического солитона в режим дискретной дифракции в системе связанных жидкокристаллических волноводных каналов;

8) разработать технологию изготовления электрически управляемых дифракционных ЖК элементов на основе твист-планарной доменной ориентации директора и провести экспериментальные и теоретические исследования их дифракционных и поляризационных характеристик;

9) разработать и изготовить дифракционные элементы, формирующие сингулярные фазовые оптические пучки в широком спектральном диапазоне;

10) разработать и изготовить электрически управляемые микроструктурированные ЖК элементы, обеспечивающие формирование пучков, несущих массивы заданного количества фазовых и поляризационных сингулярностей единичного топологического заряда. Разработать теоретическую модель фазового-поляризационного преобразования гауссовых пучков жидкокристаллическими  $q$  - пластинками с фазовым ядром;

11) разработать и изготовить электрически управляемые ЖК элементы для возбуждения фазовых и поляризационных сингулярных световых пучков, не требующие точной электрической подстройки под спектральную компоненту лазерного излучения.

**Объектами** исследования являются однородно и микроструктурированные ориентированные планарные слои нематического ЖК с электрически управляемой ориентацией директора. **Предмет** исследования – амплитудные, поляризационные и фазовые характеристики лазерного излучения при его распространении / взаимодействии в однородно ориентированных и микроструктурированных слоях нематического жидкого кристалла с электрически управляемой величиной оптической плотности или двулучепреломления. Выбранные объекты являются перспективными функциональными средами, позволяющими создавать новые экономичные и эффективные оптические устройства, осуществляющие контролируемое управление параметрами лазерного излучения в видимой и ИК спектральной области.

### **Научная новизна**

Научная новизна заключается в получении следующих результатов:

1) разработаны и экспериментально реализованы новые схемные решения ограничения мощности лазерного излучения на длине волны 532 нм на основе полиметинового красителя ПК7022, включающие использование кюветы специальной формы (торцевые грани в виде линз) и электрически управляемой ЖК ячейки с использованием функционального композита «НЖК – полиметиновый краситель»;

2) предложен и экспериментально реализован метод электрического управления дифракционной эффективностью динамических голограмм в жидкокристаллических композитах «НЖК – родамин 6Ж» и «НЖК – ПК 7098»;

3) экспериментально реализовано контролируемое переключение

направления распространения, угловое и линейное отклонение линейно поляризованного лазерного излучения при проявлении эффекта полного внутреннего отражения на рефрактивной границе с электрически индуцированным изменением ориентации директора в двудоменном слое НЖК;

4) предложена новая твист-планарная начальная ориентации директора в НЖК ячейке, обеспечивающая поляризационно чувствительный режим волноводного распространения излучения в видимом диапазоне спектра. Разработана технология многодоменной твист-планарной ориентации директора и изготовлены волноводные ЖК элементы, реализующие электрически контролируемые режимы волноводного распространения линейно поляризованного света;

5) созданы ЖК элементы, обеспечивающие электрически индуцируемый волноводный режим распространения электромагнитного излучения на основе изменения ориентации директора нематического ЖК под действием пространственно структурированного электрического поля и проведен теоретический анализ условий возбуждения устойчивого волноводного режима. Исследовано распространение световых пучков в системе связанных оптических ЖК-волноводов и реализовано электрическое управление количеством волноводных каналов. Экспериментально реализованы режимы разветвления и суммирования оптических сигналов;

6) разработана технология и создан поляризационно-чувствительный электрически управляемый дифракционный ЖК элемент с начальной твист-планарной ориентацией директора. Показано, что при подаче внешнего электрического поля с амплитудой, соответствующей условию срыва режима Могена, происходит формирование анизотропной фазовой дифракционной структуры, характеризующейся увеличением дифракционной эффективности;

7) определены энергетические и спектральные условия одноступенчатой голографической записи тонкой фазовой решетки в слое азополимера и создан дифракционный оптический элемент для формирования фазовых сингулярных пучков во всем оптическом диапазоне спектра. Продемонстрирована возможность эффективного использования созданного дифракционного элемента в схеме оптического пинцета для манипуляции микрообъектами;

8) разработан метод фотоориентации азокрасителя AtA-2 и создан новый тип ЖК q - пластинок с фазовым ядром, обеспечивающим формирование пучков, несущих массивы с заданным количеством фазовых и поляризационных сингулярностей единичного топологического заряда;

9) разработана технология и создан микроструктурированный ЖК элемент, обеспечивающий ахроматические условия формирования фазовых и поляризационных сингулярных пучков с заданной топологией волнового фронта в широком спектральном интервале. Продемонстрирован вариант



использования созданного ЖК элемента для контролируемого переключения режимов оптического захвата и вращения микрочастиц в схеме оптического пинцета.

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

1. Использование эффекта «гость – хозяин» в планарно ориентированной жидкокристаллической (ЖК) ячейке позволяет контролировать оптическую толщину композита «нематический ЖК - краситель» за счет изменения направления вектора напряженности электрического поля линейно поляризованного лазерного излучения относительно вектора дипольного момента перехода ориентированных в ЖК молекул красителя и реализовать на этой основе электрическое управление дифракционной эффективностью динамических голограмм и режима оптического ограничения мощности лазерных импульсов наносекундной длительности с порогом срабатывания на уровне 1 мДж при толщине ЖК композита ~ 10 мкм.

2. Проявление эффекта полного внутреннего отражения на рефрактивной границе в двудоменном ЖК слое с возможностью изменения геометрии взаимной ориентации директора при реализации перехода Фредерикса обеспечивает пространственное разделение и переключение направления распространения линейно поляризованного лазерного излучения при значении напряженности электрического поля ~ 0,1 В/мкм.

3. Использование твист ЖК домена в качестве оболочки и планарно ориентированного ЖК домена в качестве сердцевины в микроструктурированном ЖК слое обеспечивает волноводное распространение поляризованного света с возможностью переключения в режим оптического ослабления.

4. Переход Фредерикса в планарно ориентированном слое ЖК при воздействии микроструктурированного электрического поля с напряженностью ~ 0,1 В/мкм приводит к модуляции оптической анизотропии, обусловленной периодической планарной и гомеотропной ориентацией директора ЖК, что позволяет реализовать электрически управляемый волноводный режим распространения линейно поляризованного света, а также функции деления и суммирования оптических сигналов.

5. Микроструктурированный нематический ЖК с чередующимися твист и планарной ориентациями директора формирует поляризационно-чувствительную дифракционную решетку, функционирующую как две поляризационно независимые амплитудные решетки с прямоугольным профилем штриха, которая при подаче на ЖК слой внешнего электрического переменного напряжения с амплитудой, превышающей значение оптического порога (срыв условия Могена), трансформируется в фазовую синусоидальную дифракционную анизотропную структуру с дифракционной эффективностью,

близкой к ее предельному значению для тонких фазовых решеток 33,9%. Твист-планарная ЖК решетка с вилочной дислокацией позволяет формировать сингулярный световой пучок в видимом и ближнем ИК спектральном диапазоне.

6. Функционирующий в режиме полуволновой фазовой пластинки жидкокристаллический пространственно структурированный элемент ( $q$ -пластинка) с фазовым ядром, представляющим однородно ориентированную центральную часть ЖК элемента, обеспечивает формирование сингулярных световых полей, несущих массивы заданного количества  $N$  фазовых или поляризационных сингулярностей единичного топологического заряда; число  $N = 2q$  определяется топологическим зарядом ЖК элемента  $q$ .

7. Азимутально структурированный ЖК элемент, представляющий собой  $q$ -пластинку, состоящую из  $k$  секторов, отличающихся между собой азимутальным углом закрутки директора, при уровне управляющего напряжения, превышающее значение оптического порога (срыв условия Могена), обеспечивает ахроматический режим формирования фазовых и поляризационных сингулярных пучков, обусловленный образованием в слое ЖК двух независимых подслоев, каждый из которых функционирует как фазовая пластинка с ориентацией оптической оси, определяемой граничными условиями распределения директора на подложках элемента.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертационной работы полностью отражает вклад соискателя в разработку новых методов управления параметрами лазерного излучения на основе анизотропных однородно ориентированных и микроструктурированных электрически управляемых нематических ЖК элементов. Все результаты диссертационной работы, выносимые на защиту и определяющие ее научную и практическую значимость, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии.

Научный консультант А.Л. Толстик инициировал исследования в данном направлении и принимал участие в обсуждении задач и интерпретации полученных результатов. Соавторы публикаций О.Г. Романов (БГУ) и И.А. Гончаренко (Университет гражданской защиты МЧС РБ) провели компьютерное моделирование процессов взаимодействия электрического поля с нематическим ЖК с целью проведения теоретического анализа условий возбуждения волноводного режима в управляемых волноводных структурах. Д.В. Горбач (БГУ) принимал участие в экспериментальных исследованиях по фазово-поляризационному преобразованию лазерного излучения пространственно структурированными твист ЖК элементами и их использованию в схеме оптического пинцета. С.С. Слюсаренко (Технологический университет Гриффита, Австралия) принимал участие

в теоретической интерпретации фазового-поляризационного преобразования гауссовых световых пучков q-пластинками с фазовым ядром. С.Н. Тимофеев принимал участие в компьютерном моделировании процессов переориентации директора ЖК в проявлении электрооптических эффектов. А.А. Муравский, А.Ан. Муравский (Институт химии новых материалов НАНБ) разработали и синтезировали азокраситель для ориентации ЖК и принимали участие в интерпретации результатов экспериментов, касающихся электрооптических свойств пространственно структурированных твист ЖК элементов, проведенных на основе компьютерного моделирования режимов их функционирования. И.И. Рушнова, О.С. Кабанова и А.А. Комар (БГУ) принимали участие в проведении экспериментов по реализации эффектов ПВО и волноводного распространения света в нематических жидких кристаллах. А.А. Казак и Л.А. Казак (БГУ) принимали участие в создании ЖК дифракционных элементов. Т.В. Габрусева (БГУ) принимала участие в экспериментах по формированию солитонного режима в кристаллах ВТО, А.С. Бондарчук (БГУ) принимала участие в экспериментах по ОВФ. Соавторы В.В. Могильный и А.И. Станкевич (БГУ) синтезировали фотоориентирующие полимерные материалы для ориентации ЖК. М.П. Самцов, А.А. Луговский (НИИ ПФП) разработали и синтезировали полиметиновые красители, использованные в схемах оптического лимитирования. А.Ю. Мешалкин и Е.А. Акимова (Институт прикладной физики Министерства образования, культуры и исследований Республики Молдова) предоставили азополимер, использованный для записи рельефных голограмм.

Остальные соавторы занимались исследованием проблем, не отраженных в диссертационной работе.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований, включенных в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях, семинарах и симпозиумах: Congress on optics and optoelectronics: Nonlinear Optics Applications (Warszawa, Poland, 28 august – 2 September 2005), X, XI Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» «Волны-2005», «Волны-2007» (Москва, Звенигород, 23-28 мая 2005, 21-26 мая 2007), 6-th International Conference on Electronic Processes in Organic Materials «ICEPOM-6» (Gurzuf, Crimea, Ukraine, 25-29 September 2006), VI, VII Международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, 25-29 сентября 2006, Минск, 17-19 июня 2008), Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006, 15-19 октября 2012, 20-24 октября 2014, 17-21 октября 2016, 19-23 октября 2020), International Conference on Coherent and Nonlinear

Optics (ICONO) (Minsk, Belarus, 28 may – 1 June 2007), 4<sup>th</sup>, 8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2008, 2019) (Alushta, Crimea, Ukraine, 29 September – 4 October, 2008, Sozopol, Bulgaria, September 6-8 2019), VIII Международной конференции «Прикладная оптика – 2008» (С.-Петербург, 20-24 окт. 2008), II, V Конгрессе физиков Беларуси (Минск, 3-5 ноября 2008, 27-30 октября 2015), International Conference «Functional Materials» ICFM 2009 (Partenit, Crimea, Ukraine, 5-10 October 2009), International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences» (Minsk, June 15-19 2010), VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011» (Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011), 18<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2016) (Trento, Italy, July 10–14 2016), Международной конференции «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 18-22 октября 2010, 21-24 октября 2014), IV, VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва 28-30 января 2015, 23-25 января 2019), International Conference «Nanophotonics and Micro/Nano Optics» (Spain, Barcelona, 13 – 15 September 2017), XV, XVIII Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (Москва, 11 – 13 сентября 2018, Геленжик 21 – 22 сентября 2021), International Conference Laser Optics (ICLO) (Saint-Petersburg, November 2-6 2020), 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS - SPRING) (Rome, Italy, June 17–20, 2019).

Результаты диссертационной работы использованы на НП РУП «Актив БГУ» для изготовления жидкокристаллических элементов при выпуске партии оригинальных установок для экспериментального тура Международной олимпиады по физике на основе электрически управляемых жидкокристаллических элементов по международному контракту с РГКП «Республиканский научно-практический центр «Дарын», Республика Казахстан (акт о внедрении в производственный процесс), ЗАО «Голографическая индустрия» в процессе формирования анизотропных меток при производстве голографических элементов защиты от подделки ценных бумаг и документов (акт о внедрении в производственный процесс), в ИХНМ НАН Беларуси при разработке фотоориентируемых тонкопленочных материалов на основе азокрасителей и оптимизации их свойств для применения в создании фотонных устройств (акт о практическом использовании), а также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета для специальности лазерная физика и спектроскопия (6 актов об использовании в учебном процессе) и Командно-инженерного института МЧС РБ для специальностей «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» и «Пожарная и промышленная безопасность» (акт об использовании в учебном процессе).

## **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 76 научных работах, из которых 29 статей в рецензируемых научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и ученых званий, в том числе 14 – в зарубежных научных изданиях (общим объемом 17 авторских листов), 34 статьи в сборниках материалов научных конференций и 13 тезисов докладов на международных научных конференциях.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений условных и обозначений, введения, общей характеристики работы, восьми глав, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 322 страницы, в том числе 187 рисунков на 75 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 1 приложение на 12 страницах. Список использованных источников содержит 493 наименования, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 43 страницах).

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Глава 1** посвящена вопросам прикладного использования эффекта «гость – хозяин», включающим лимитирование лазерного излучения и управление дифракционной эффективностью динамических решеток в нематическом ЖК, активированном красителем. В **разделе 1.1** приведен анализ современных исследований, касающихся перспектив использования эффекта «гость-хозяин» для ряда приложений современной фотоники.

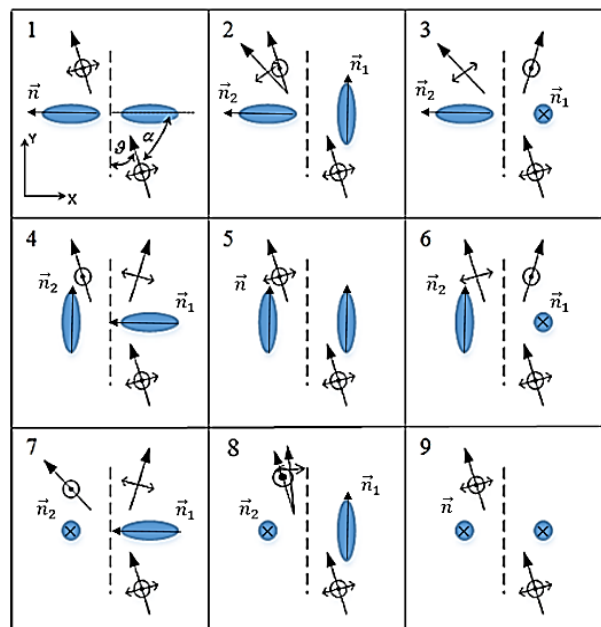
В **разделе 1.2** обоснована актуальность исследований по разработке эффективных ограничителей мощности лазерного излучения и создания элементов динамической защиты органов зрения и сенсоров оптического излучения от лазерных импульсов. Представлены результаты экспериментальных исследований по разработке оригинальных схем ограничения мощности лазерного излучения в нано- и пикосекундном диапазоне длительностей на длине волны 532 нм на основе полиметиновых красителей, включающие использование кюветы специальной формы (торцевые грани в форме линз) и электрически управляемой ЖК ячейки на основе композита «НЖК – полиметиновый краситель». Экспериментально показано, что использование ЖК композита в планарно ориентированной ЖК ячейке позволяет на три порядка уменьшить толщину лимитирующего слоя (до 20 мкм) при обеспечении порога срабатывания устройства на уровне 1 мДж по сравнению со схемой с использованием линз, что, наряду с возможностью электрического управления, расширяет практические сферы использования композита «НЖК – полиметиновый краситель» в системах динамической защиты от лазерного воздействия.

В разделе 1.3 обоснована актуальность исследований в области динамической голографии, касающихся поиска новых сред и методов с целью повышения эффективности голографических решеток и возможностью ее управляемого контроля. Представлены результаты экспериментальных исследований по разработке и реализации метода управления дифракционной эффективностью динамических голограмм в жидкокристаллических композитах «НЖК-807 – родамин 6Ж» и «НЖК-807 – ПК 7098» за счет контролируемого изменения их оптической толщины. Изменение геометрии взаимной ориентации дипольного момента молекул красителя, входящего в композит, и вектора поляризации записывающих голограмму световых волн обеспечило трехкратное изменение дифракционной эффективности динамических голограмм для композита «НЖК-807 – родамин 6Ж» и полуторакратное для композита «НЖК-807 – ПК 7098». Экспериментально реализовано электрическое управление дифракционной эффективностью динамических голограмм при проявлении перехода Фредерикса.

В главе 2 представлены результаты экспериментальных исследований условий реализации эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) на электрически контролируемой рефрактивной границе в планарном слое НЖК, реализовано электрически управляемое поляризационное разделение и переключение световых пучков, а также управление направлением распространения лазерного излучения.

В разделе 2.1 на основании обзора научных литературных данных обоснована актуальность исследований по разработке эффективных планарных ЖК устройств для электрического управления поляризованным лазерным излучением на основе эффекта ПВО.

В разделе 2.2 проведен анализ возможности проявления эффекта ПВО в двумерной жидкокристаллической ячейке при различной взаимной ориентации директора ЖК  $\vec{n}$  в двух смежных областях НЖК (рисунок 1) и получены соответствующие



**Рисунок 1 – Планарное распространение линейно поляризованного света в НЖК ячейке с рефрактивной границей**

соотношения для определения предельного угла полного внутреннего отражения линейно поляризованного света, распространяющегося в НЖК, оптические свойства которого определяются показателями преломления для обыкновенной и необыкновенной волны  $n_o$  и  $n_e$ .

Эффект ПВО на рефрактивной границе можно реализовать в следующих случаях:

1. Линейно поляризованная волна ( $s$  – поляризация) входит в двумерную ортогонально ориентированную (гомеотропно и планарно) структуру со стороны гомеотропно ориентированного ЖК домена (рисунок 1, варианты 3 и 6). Критический угол ПВО для этого случая определяется выражением  $\alpha_{TIR} = \arcsin(n_o/n_e)$ .

2. Линейно поляризованная волна ( $p$  – поляризация) входит в двумерную структуру с ортогональной планарной ориентацией директора со стороны ЖК домена с направлением директора параллельно нормали к рефрактивной границе (рисунок 1, варианты 4 и 7).

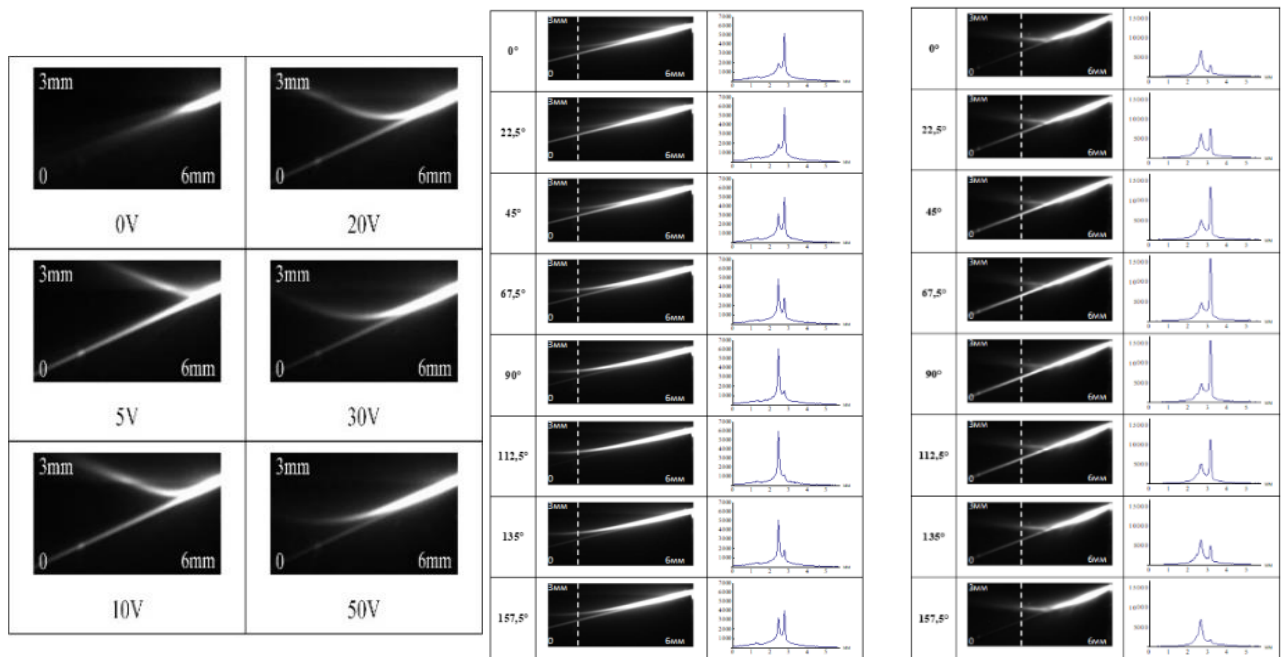
Критический угол ПВО определяется выражением  $\alpha_{TIR} = \arcsin \frac{n_e}{\sqrt{2n_e^2 - n_o^2}}$ .

В работе созданы ЖК элементы с электрически управляемой рефрактивной границей между ЖК доменами с ориентацией директора, соответствующих вариантам 4 и 6 рисунка 1. В основе их создания были использованы две принципиально разные технологии:

- травления электрода (структурированный электрод) – использование электрода на половине одной из подложек ЖК ячейки, позволяющее при подаче на планарно ориентированный ЖК элемент (вариант 5) внешнего управляющего напряжения сформировать в его плоскости двумерную планарно-гомеотропную ориентацию директора ЖК (вариант 6). Начальная однородная планарная ориентация НЖК в ячейке задавалась методом натирания ориентирующего фотополимера с последующей фиксацией ориентирующего действия неполяризованным излучением на длине волны  $\lambda = 310$  нм;
- доменной фотоориентации – задание в плоскости ЖК элемента двумерной начальной планарной ортогональной ориентации директора ЖК методом натирания двух слоев ориентирующего фотополимера в двух ортогональных направлениях (с фиксацией неполяризованным светом  $\lambda = 310$  нм) с последующим травлении верхнего полимерного слоя с половины подложки (рисунок 1 вариант 4).

В разделах 2.3 и 2.4 описаны ЖК ячейки, созданные для реализации электрически управляемого эффекта ПВО, состоящие из стеклянных подложек

с прозрачным электродом (ITO) и ориентирующим фотополимерным покрытием для задания начальной ориентации директора. Толщина НЖК слоя контролировалась спейсерами и составляла 200 мкм. Ячейки заполнялись нематическим жидким кристаллом ВИН 9 в изотропной фазе. Показатели преломления на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм  $n_e = 1,69$  и  $n_o = 1,53$ . Пороговое напряжение перехода Фредерикса  $U_t = 1,1$  В. Излучение He-Ne лазера мощностью  $W=100$  мкВт планарно вводилось в торец ЖК элемента с помощью линзы (диаметр перетяжки 50 мкм) под углом к рефрактивной границе  $\alpha$ , превышающим значение предельного угла ПВО. На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований эффекта ПВО, реализованных для топологий ориентации директора НЖК, соответствующих рисунку 1, варианты б (рисунк 2, а, б метод травления электрода) и 4 (рисунк 2, в, метод начальной ортогональной ориентации директора), зарегистрированные для различной ориентации плоскости поляризации входящего в ЖК слой лазерного излучения (угол отсчитывается относительно горизонтальной ориентации электрического вектора напряженности световой волны). Распространение электромагнитного излучения в плоскости ЖК слоя регистрировалось ПЗС камерой. В соответствии с оценкой условия ПВО при формировании рефрактивной границы методом травления электрода значение предельного



*a*

*б*

*в*

**Рисунок 2– Эффект ПВО в двумерной ЖК ячейке:**

***a* – метод травления электрода при разном напряжении; *б* – метод травления электрода при разных ориентациях плоскости поляризации ( $U=50$  В); *в* – метод начальной ортогональной ориентации директора при разных ориентациях плоскости поляризации**



угла для используемого НЖК составляет  $\alpha_{\text{TR}} = 65^\circ$  для вертикальной поляризации светового пучка (рисунок 2, а, б). Нужно отметить, что эффект ПВО, связанный с переориентацией директора ЖК (S-эффект), наблюдался уже при напряжениях порядка 3 В – 5 В, несмотря на большую толщину ячейки (200 мкм). При трехкратном превышении порогового напряжения угол поворота директора на  $\theta = \pi/2$  (гомеотропная ориентация) реализуется в центральной области слоя ЖК толщиной 80 мкм, что учитывалось при оценке диаметра пучка, вводимого в ЖК элемент (50 мкм).

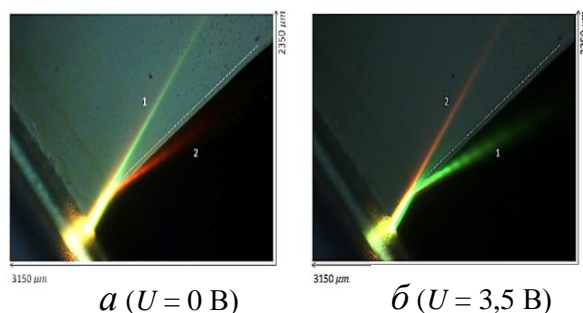
При реализации эффекта ПВО на рефрактивной границе двудоменной планарной ортогональной ориентации директора для использованного НЖК предельный угол ПВО составляет  $\alpha_{\text{TR}} = 67^\circ$  при входящей горизонтальной поляризации света (рисунок 2, в). Данная геометрия ориентации ЖК не требует использования электрического поля для формирования границы раздела двух мезофаз. Приложение внешнего электрического поля приводит к переориентации директора во всем объеме НЖК и рефрактивная граница исчезает.

Величина контрастности созданных ЖК элементов, определяемая наличием перекрестных помех составила ПП=10:1 ( $T_{\text{max}}/T_{\text{min}}$ ), что связано с образованием широкой (порядка 100 мкм) линии дисклинации ЖК на границе раздела ориентации планарных ЖК доменов и влиянием неравномерностей границы электрода на ориентацию директора.

В разделе 2.5 представлены результаты экспериментальных исследований по созданию рефрактивной границы ортогональной ориентации директора ЖК в смежных доменных областях на основе использования в качестве фотоориентанта азокрасителя AtA-2. Спектральная чувствительность красителя в видимой области спектра ( $\lambda = 440 \text{ нм} - 460 \text{ нм}$ ) и обратимость механизма ориентации, позволили упростить технологию изготовления ЖК элементов с рефрактивной границей, а также расширить их функциональные возможности и улучшить оптические характеристики.

Были изготовлены ячейки с планарной-гомеотропной ориентацией директора по технологии травления электрода и начальной планарной ортогональной ориентации директора в смежных областях. Спектральная чувствительность азокрасителя позволила произвести процедуру задания начальной двудоменной ориентации директора в собранном ЖК элементе, что отразилось на качестве рефрактивной границы (ширина линии дисклинации 4 мкм). Экспериментально оцененная величина азимутальной энергии сцепления молекул ЖК с ориентантом превышала значение  $W_{\phi} > 1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/м}^2$  в диапазоне дозы облучения  $D = 0,25 \text{ Дж/см}^2 - 0,5 \text{ Дж/см}^2$  на длине волны активации  $\lambda = 450 \text{ нм}$ . Параметр качества ориентации изготовленных образцов

составляет  $q = 0,996-0,998$ , коэффициент перекрестных помех ПП=100:1. Толщина ЖК-слоя в изготовленных элементах составляла 20 мкм. Потери на распространение составили величину менее 1 дБ/мм. Контроль рефрактивной границы проводился при амплитуде управляющего напряжения до 5 В. Совмещение двух технологий создания рефрактивной границы позволило реализовать электрически управляемое пространственное разделение и переключение поляризованных лазерных пучков. Для реализации электрического переключения ортогональных поляризационных мод были использованы две геометрии, связанные с начальной планарной ортогональной ориентацией директора в двух областях элемента (рисунок 1 вариант 4) и с планарной и гомеотропной ориентациями директора в смежных областях при подаче напряжения на одну часть ЖК слоя (метод травления электрода) (рисунок 1 вариант б), совмещенные в одном ЖК – элементе. При отсутствии внешнего поля (рисунок 3а,  $U = 0$  В) происходит отражение горизонтально поляризованного излучения He-Ne лазера, в то время как вертикально поляризованное излучение второй гармоники Nd:YAG лазера проходит через границу, не изменяя направления распространения. При включении поля (рисунок 3б,  $U = 3,5$  В) ситуация меняется на противоположную – условие ПВО выполняется для вертикально поляризованного излучения второй гармоники Nd:YAG лазера, при этом излучение He-Ne лазера проходит через границу, не изменяя направления распространения. Разработанный и изготовленный ЖК элемент выполняет электрически управляемую функцию поляризационного деления и переключения лазерного излучения.



**Рисунок 3 – Переключение ортогонально поляризованных лазерных лучей (3150мкм x 2350мкм)**

В разделе 2.6 представлены результаты экспериментальных исследований отклонения лазерного излучения при электрическом управлении пространственной локализацией рефрактивной границы в двудоменном ЖК элементе (рисунок 1 вариант б). Пространственный сдвиг электрически индуцированной рефрактивной линейной границы двудоменной ориентации директора при изменении величины управляющего электрического поля на ЖК элементе с толщиной нематика 20 мкм позволил экспериментально реализовать линейное смещение траектории отраженного в условиях ПВО лазерного излучения на 185 мкм от ее первоначальной пространственной локализации при

изменении амплитуды внешнего поля на 20 В. Электрически управляемое смещение дугообразной рефрактивной границы с радиусом кривизны  $R = 3$  см обеспечило реализацию управляемого углового отклонения отраженной световой волны на 2,5 мрад при изменении амплитуды внешнего поля на 20 В.

**Глава 3** посвящена разработке и созданию электрически управляемых волноводных НЖК-микроструктур. **Раздел 3.1** содержит краткую обзорную часть, касающихся вопросов развития фотонных технологий, связанных с методами формирования и функционирования управляемых волноводных каналов для приложений интегральной фотоники. Обоснованы преимущества использования жидкокристаллических сред по сравнению с другими электрооптическими материалами в качестве функционального материала для создания электрически реконфигурируемых волноводных каналов. Обоснована необходимость поиска новых топологий ориентации директора в слое НЖК для оптимизации параметров возбуждения режима волноводного распространения электромагнитного излучения в ЖК и расширения функциональных возможностей волноводных ЖК элементов.

В **разделе 3.2** представлены методы создания ЖК структур с электрически управляемой модуляцией показателя преломления ЖК: метод текстурированной фотоориентации и метод текстурированного электрического поля на основе которых были разработаны электрически управляемые волноводные анизотропные элементы. Элементы представляют собой ЖК ячейку типа сэндвич. Толщина НЖК слоя составляла  $d = 20$  мкм, Показатели преломления на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм  $n_e = 1,67$  и  $n_o = 1,49$ . Пороговое напряжение  $U_t = 1,1$  В. В зависимости от метода возбуждения волноводного режима в слое ЖК в конструкции элементов использовались однородные (ITO) и структурированные (Cr) электропроводящие слои, обеспечивающие возможность электрического управления пространственной модуляцией показателя преломления в ЖК слое.

**Раздел 3.3** посвящен экспериментальным исследованиям по созданию волноводных электрически управляемых ЖК-структур с начальной многодоменной твист – планарной ориентацией директора. В **подразделе 3.3.1** определены преломляющие свойства микроструктурированного ЖК слоя с чередующейся планарной и твист-структурой ориентации директора и обоснована возможность возбуждения в такой структуре волноводного распространения горизонтально поляризованного лазерного излучения ( $p$  - поляризация). В отсутствие напряжения на элементе в области твист доменов значение показателя преломления по толщине ЖК слоя  $n_{ef}(x)$  лежит в области значений от  $n_e = 1,67$  до  $n_o = 1,49$  на длине волны  $\lambda = 633$  нм, что определяет возможность реализации волноводного НЖК канала при использовании твист домена в качестве оболочки ( $n_{оболочка} = \langle n_{ef}(x) \rangle = 1,58$ ) и планарно

ориентированного ЖК домена в качестве ядра ( $n_{\text{сердцевина}} = n_e = 1,67$ ). При подаче управляющего напряжения с амплитудой значительно превышающей пороговое значение ( $U \gg U_t$ ) обе ЖК структуры (планарная и твист) ориентируются гомеотропно и модуляция оптической анизотропии исчезает.

**В подразделе 3.3.2** изложена оригинальная методика изготовления волноводных электрически управляемых элементов с твист – планарной ориентацией директора НЖК, основанная на необратимом эффекте наведенной анизотропии на поверхности ориентирующего ЖК фотополимерного слоя при двухэтапном облучении фотополимерного слоя линейно-поляризованным активирующим УФ-излучением ( $\lambda = 255 \text{ нм}$ , облучающая доза  $D = 100 \text{ мДж} \cdot \text{см}^{-2}$ ) через кварцевую прямоугольную амплитудную решетку с периодом 20 мкм, что обеспечило создание микроструктурированных волноводных ЖК элементов с шириной волноводных каналов 10 мкм. Оцененный параметр оптического качества созданных элементов составил  $q = 0,988$ .

**В подразделе 3.3.3** представлены результаты экспериментальных исследований по волноводному распространению света в электрически управляемых элементах с твист – планарной ориентацией директора НЖК. Линейно поляризованное лазерное излучение He–Ne-лазера ( $\lambda = 633 \text{ нм}$ , мощность 20 мВт) планарно вводилось в ЖК-волноводный элемент. Диаметр перетяжки световых пучков на входе в ЖК-ячейку составлял 8 – 10 мкм.

В выключенном режиме ( $U = 0 \text{ В}$ ) в ЖК элементе реализуется волноводное распространение лазерного излучения, основанное на эффекте ПВО на рефрактивной границе ЖК-доменов с твист-планарной ориентацией директора. Разрушение волноводных каналов проявляется при величине управляющего напряжения порядка 3 В, что связано с раскручиванием твист структуры по азимутальному углу и проявлению двулучепреломления в обеих смежных ЖК областях, приводящему к нарушению условий ПВО.

**В подразделе 3.3.4** изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований условий возбуждения волноводного режима распространения лазерного излучения в НЖК-структуре с периодической системой электрически индуцируемых волноводов с контролируемой величиной модуляции оптической анизотропии.

Методом лазерной литографии на поверхности одной из стеклянных подложек ЖК элемента была сформирована токопроводящая периодическая система электродов (Cr, период  $\Lambda = 20 \text{ мкм}$ , скважность 1/2). Проводящий прозрачный слой ИТО на второй подложке элемента покрывал всю ее поверхность. Начальная планарная ориентация директора была реализована на основе метода фотоориентации фотополимерного ориентирующего материала на длине волны активации 310 нм при дозе облучения  $D \geq 2 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ , что

обеспечило параметр качества ЖК ячейки  $q=0,996$  при величине азимутальной энергии сцепления ЖК  $\langle E_\phi \rangle = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} / \text{м}^2$ . Пространственно модулированное электрическое поле формирует в планарно-ориентированном НЖК-слое периодическое распределение показателя преломления для линейно поляризованного света с  $\Delta n(U) = n_{ef}(U) - n_o$ .

В выключенном состоянии ориентация директора ЖК волноводного элемента планарная по всей его плоскости и наблюдается выраженное дифракционное расплывание линейно поляризованного лазерного луча в ЖК-слое. При подаче на ЖК-элемент управляющего напряжения, превышающего пороговое значения перехода Фредерикса, наблюдается захват светового пучка волноводным каналом, который окончательно формируется при трехкратном превышении порога ( $U > 3\text{В}$ ).

**В разделе 3.4** изложены результаты экспериментальных исследований по реализации режимов разветвителя и сумматора световых сигналов. В соответствии с разработанными геометриями токопроводящих структур на ОАО «Интеграл» изготовлены стеклянные подложки со структурой электродов, представляющих собой одиночные и сдвоенные «вилочки» с шириной электродов 20 мкм - 40 мкм. ЖК волноводные элементы изготавливались по технологии, описанной в разделе 3.4. Продемонстрирована возможность электрического управления функциями деления и суммирования световых оптических сигналов.

**В разделе 3.5** приведены результаты численного моделирования процесса электрически управляемого волноводного распространения линейно поляризованного электромагнитного излучения в ЖК ячейке со структурированным электродом. Численное моделирование проводилось на основе решения волнового уравнения для комплексной амплитуды светового пучка совместно с уравнением, описывающим двумерную ориентацию директора в объеме ЖК элемента. На основании решения уравнения Максвелла для распределения статического структурированного электрического поля определена зависимость пространственного распределения индуцированной модуляции показателя  $\Delta n(x, y, E_{эл})$ . Продемонстрировано хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов. В частности, показано, что при напряжении  $U = 3,5 \text{ В}$  и выше в ЖК элементе формируется волноводный канал при значениях эффективного показателя преломления  $n_{eff} = 1,5064, 1,5293$  и  $1,5515$  для значений амплитуды управляющего напряжения  $U = 3,5\text{В}, 5\text{В}$  и  $7 \text{ В}$ , соответственно. При этом достигаются низкие значения потерь на локализацию электромагнитного поля ( $Los = 0,0002 \text{ дБ/м}$  при  $U = 3,5 \text{ В}$  и  $Los = 0 \text{ дБ/м}$  при  $U = 5,0 \text{ В}$ ) и поперечное распределение мощности светового сигнала не меняется при его распространении вдоль волноводной структуры.

**Глава 4** посвящена экспериментальным исследованиям условий возбуждения пространственных солитонов в фоторефрактивном кристалле титаната висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ) и нематическом ЖК. В **разделе 4.1** приведен краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, касающихся вопросов формирования пространственных солитонов в фоторефрактивных и жидких кристаллах, на основании которого обоснован выбор направления исследований.

В **разделе 4.2** приводятся оригинальные экспериментальные результаты анализа условий возбуждения низкоинтенсивных (на уровне нано- и микроватт) пространственных солитонов в фоторефрактивном кристалле ВТО. Впервые реализовано формирование пространственного солитона при мощности светового пучка на уровне десятка нановатт. Определены пороговое значение напряженности внешнего электрического поля (более 5 кВ/см) и диапазон мощности светового пучка ( $\sim 10$  нВт – 1 мкВт), при которых наблюдаются пространственные солитоны.

В **разделе 4.3** приводятся оригинальные экспериментальные результаты анализа условий возбуждения и особенности распространения и взаимодействия пространственных оптических солитонов в планарно ориентированном слое нематического жидкого кристалла толщиной 100 мкм. Определено пороговое значение светоиндуцированного перехода Фредерикса ( $40$  кВт/см<sup>2</sup>), превышение которого ведет к образованию устойчивого пространственного нематикона, и продемонстрирована возможность чисто оптического управления пространственным распространением излучения за счет взаимодействия двух солитонов, возбужденных в планарном НЖК слое.

**Раздел 4.4** посвящен распространению светового пучка в системе электрически индуцируемых НЖК-волноводов. В **подразделе 4.4.1** экспериментально исследованы особенности линейного и нелинейного распространения световых пучков в системе связанных оптических НЖК-волноводов. В качестве сердцевины планарного волновода использовался слой НЖК толщиной 100 мкм. Показатели преломления НЖК для лазерного излучения с длиной волны 633 нм составляли:  $n_e = 1,67$  и  $n_o = 1,49$ . Начальная планарная ориентация директора НЖК реализована по технологии, описанной в разделе 3.4. Электрически управляемая модуляция величины показателя преломления, приводящая к формированию волноводных каналов, реализована по технологии структурированного электрода. Ширина электропроводящих полос хрома составляла 20 мкм (период структуры  $\Lambda = 40$  мкм). Лазерное излучение мощностью  $W = 3,0$  мВт имело на входе в ЖК элемент радиус перетяжки  $r_0 \approx 40$  мкм. При напряжении на ЖК слое  $U = 1,1$  В наблюдается формирование пространственного солитона. Увеличение амплитуды внешнего

напряжения позволяет реализовать управляемое переключение между солитонным режимом и режимом дифракции светового пучка и осуществить функции оптического разветвителя с управляемым количеством включаемых каналов (10 каналов) путем варьирования управляющего напряжения в диапазоне от 1,1 В до 6,0 В. В подразделе 4.4.2 проведен теоретический анализ распространения световой волны в системе связанных ЖК волноводов на основе решения нелинейного волнового уравнения для комплексной амплитуды поля с учетом нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости НЖК слоя от напряженности световой волны и внешнего структурированного электрического поля. Показано, что в условиях слабой пространственной модуляции диэлектрической проницаемости слоя НЖК основной вклад в изменение пространственной структуры светового пучка определяется эффектом самофокусировки. Увеличение внешнего электрического поля приводит к росту амплитуды модуляции диэлектрической проницаемости ЖК слоя и совместному проявлению эффектов электрически и оптически индуцированной модуляции диэлектрической проницаемости слоя НЖК. Формирование при этом сложной многомодовой структуры излучения и проявление дискретной дифракции позволяют осуществить управление световым сигналом с контролем количества волноводных каналов.

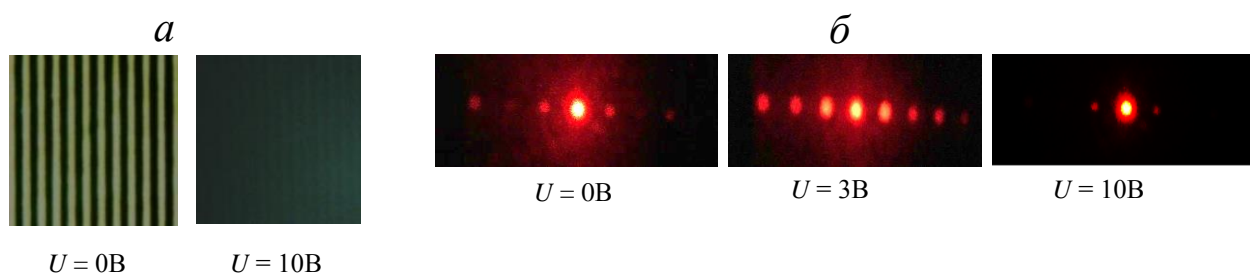
**Глава 5** посвящена разработке и исследованию электрически управляемого твист-планар ЖК дифракционного элемента для реализации эффективного электрического управления пространственными, энергетическими и поляризационными характеристиками световых полей.

В разделе 5.1 приведены результаты экспериментальных исследований дифракционных структур, сформированных в слое НЖК ВИН 9 на основе метода фотостимулированной поверхностной анизотропии полимерных материалов и продемонстрировано электрическое управление дифракционной эффективностью ЖК-структуры, представляющей собой периодическое чередование твист-планарных ЖК доменов. При толщине ЖК слоя 20 мкм и периоде 20 мкм начальная дифракционная эффективность ( $U=0$  В) на длине волны 632 нм составила 20%. Максимальная дифракционная эффективность при подаче электрического поля составила 30% ( $U=2$  В).

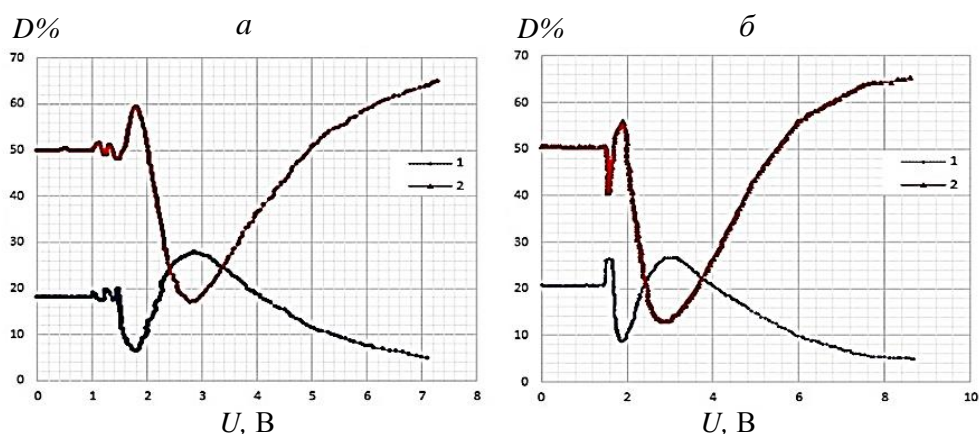
В разделе 5.2 на основе методики, изложенной в подразделе 3.3.4, создан электрически управляемый твист-планар ЖК дифракционный элемент с периодом 20 мкм и толщиной ЖК слоя 20 мкм (рисунок 4).

Экспериментально исследованы поляризационные особенности дифракции света и выявлены различия в зависимостях дифракционной эффективности от величины управляющего напряжения для двух ортогональных поляризаций (рисунок 5).





**Рисунок 4 – Дифракционная ЖК структура и картины дифракции:**  
***a* – фотографии ЖК-дифракционного элемента**  
**(поляризационный микроскоп  $U = 0$  и  $U = 10$  В); *б* – картина дифракции**



***1* – нулевой порядок, *2* – первый порядок дифракции**  
**Рисунок 5 – Зависимости дифракционной эффективности от напряжения:**  
***a* - горизонтально, *б* – вертикально поляризованное излучение**

В подразделе 5.2.1 представлены результаты теоретического исследования дифракции линейно поляризованного света на разработанном ЖК элементе. Анализ зависимости дифракционной эффективности от управляющего напряжения проведен в приближении тонкой фазовой решетки на основании расчетов зависимостей полярного и азимутального углов ориентации директора ЖК в планарной и твист областях дифракционного элемента от управляющего напряжения и находится в полном согласии с экспериментальными результатами. В подразделе 5.2.2 для качественного объяснения экспериментальных результатов, полученных в разделе 5.2, величина управляющего напряжения была разбита на четыре диапазона, отличающихся характером распределения директора в твист доменах: **Твист структура (Режим Могена)**. Режим, соответствующий повороту плоскости поляризации, определяет характер функционирования дифракционного ЖК элемента как дифракцию линейно поляризованного света на двух поляризационно независимых амплитудных решетках  $D_{ef} = 20\%$ ; **Срыв режима Могена (двулучепреломление)**. При достижении значения управляющего



напряжения порядка  $U = 1,5$  В, соответствующего срыву режима Могена, в ЖК слое проявляется двулучепреломление, приводящее к трансформации дифракционной структуры в тонкую фазовую решетку, характеризующуюся немонотонной зависимостью дифракционной эффективности от напряжения. **Гибридная ориентация.** При уровне управляющего сигнала порядка 3В твист структура раскручивается относительно азимутального угла и твист домен перестает изменять состояние поляризации входного пучка. Дифракционная эффективность достигает максимального значения  $D_{ef} = 28\%$  при величине управляющего напряжения  $U = 3$  В. Величина максимального значения дифракционной эффективности свидетельствует о трансформации прямоугольного профиля штриха решетки в профиль, близкий к синусоидальному, для которого предельное значение дифракционной эффективности 33,9 %. **Гомеотропная ориентация ЖК.** Дальнейшее увеличение амплитуды управляющего напряжения приводит к переориентации директора ЖК в планарном и твист доменах до значения полярного угла  $90^\circ$ , что приводит к исчезновению дифракционной структуры. В подразделе 5.2.3 проведен экспериментальный и теоретический анализ состояния поляризации дифрагированного света на разработанном ДЭ для различных уровней амплитуды управляющего напряжения. Теоретический анализ выполнен на основе матричного формализма Джонса с использованием результатов расчета значений полярного (для планарной ориентации ЖК) и полярного и азимутального углов ориентации ЖК (твист домен) при различных значениях управляющего напряжения (подраздел 5.2.2). Полученные теоретические и экспериментальные результаты находятся в полном согласии.

**Глава 6** посвящена разработке электрически управляемых дифракционных оптических элементов для формирования сингулярных световых пучков. В разделе 6.1 на основе обзора научной литературы приведено описание фазовой структуры оптических вихрей и методов определения их топологического заряда.

В разделе 6.2 описаны особенности поляризационной структуры векторных полей и перспективы их практического использования.

В разделе 6.3 изложен метод формирования сингулярных фазовых полей при дифракции на решетках с дислокацией штрихов и обоснована перспектива поиска новых сред для создания таких решеток.

В разделе 6.4 определены энергетические и спектральные условия одноступенчатой голографической записи формирующих оптические вихри дифракционных оптических элементов на основе карбазолсодержащих азополимеров. По схеме Лейта-Упатниекса произведена голографическая запись вортекс-голограммы, представляющей собой рельефную фазовую дифракционную структуру с периодом  $\Lambda = 8$  мкм -10 мкм. Дифракционная

эффективность на длине волны 650 нм составила 18%. Экспериментально исследована топология генерируемых оптических фазовых сингулярностей и определен диапазон устойчивости оптического вихря с топологическим зарядом  $l=2$ . Продемонстрирована эффективность их использования в схеме оптического пинцета.

В разделе 6.5 на основе предложенной технологии твист-планарной доменной ориентации директора ЖК, представленной в главе 5, разработаны и созданы электрически управляемые топологические ЖК дифракционные элементы для формирования фазовых сингулярных пучков в широком спектральном диапазоне (рисунок б), имеющих два рабочих состояния: генерация оптических вихрей с эффективностью близкой к 20% (не требует подстройки под спектральную область); генерация оптических вихрей с дифракционной эффективностью 25 % - 30 % при незначительной подстройке. Проведен анализ устойчивости оптического вихря, образованного топологическим дифракционным ЖК элементом к длине распространения и величине управляющего напряжения.

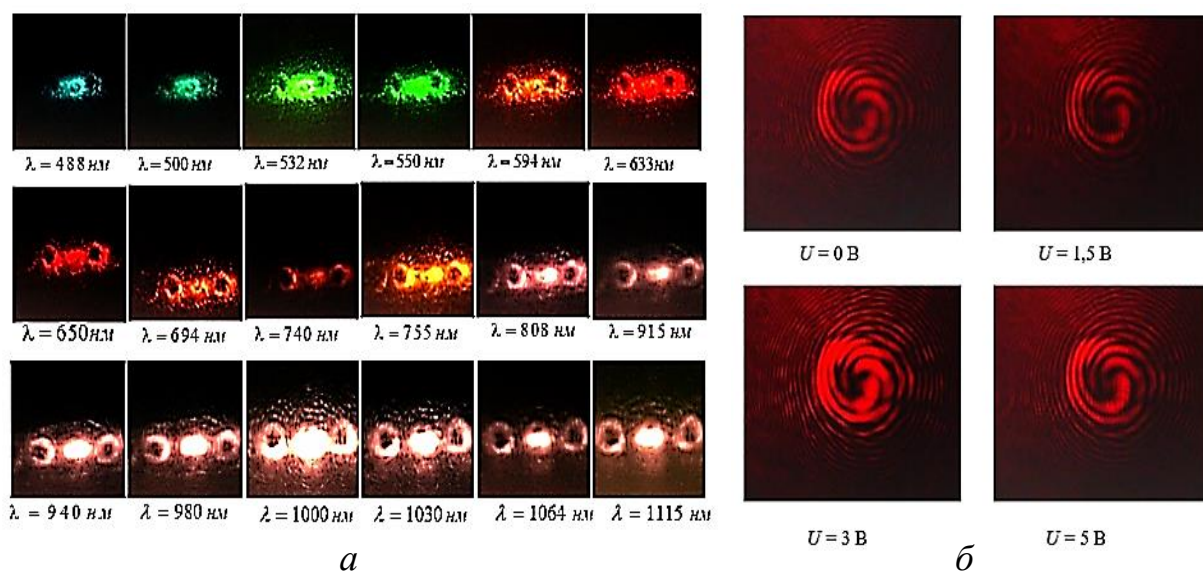


Рисунок 6 – Дифракция на ЖК элементе:

*a* - общая картина дифракции лазерного излучения параметрического лазера ( $U=0\text{В}$ ), *б* – картины интерференции пучка  $K=+1$  порядка дифракции ( $l=4$ ) со сферической волной при различных напряжениях

В главе 7 представлены результаты разработки и экспериментального и теоретического исследования ЖК q-пластинок с фазовым ядром, для формирования пучков, несущих массивы заданного количества фазовых и поляризационных сингулярностей единичного топологического заряда  $|l|=1$ .

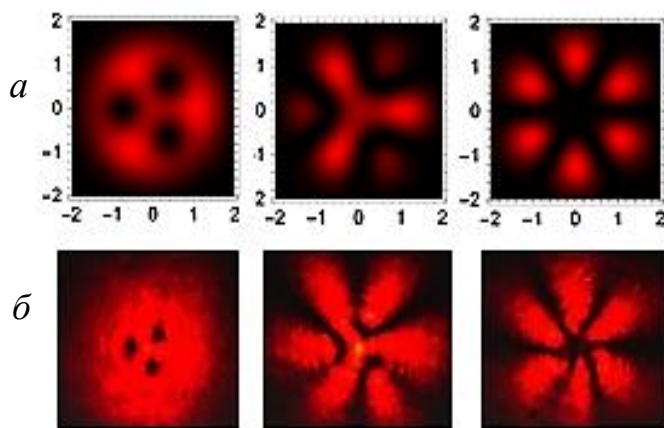
В разделе 7.1 на основании литературного обзора описаны физические свойства ЖК  $q$ -пластинок, формирующих оптические и векторные вихри и методы создания световых сингулярных пучков со сложной фазовой и поляризационной структурой ЖК элементами и обоснован разработанный метод.

В разделе 7.2 изложена методика создания  $q$ -пластинок с фазовым ядром на основе метода фотоориентации азокрасителя AtA-2 излучением светодиода (440 нм–460 нм, плотность мощности 15 мВт/см<sup>2</sup>) с использованием пространственной диафрагмы в форме клина (2°). Фазовое ядро представляет собой центральную область элемента  $q$ -пластинки, где ориентация директора ЖК определена однородными граничными условиями на подложках элемента. ЖК элемент состоит из 180 секторов, с различным значением азимутального угла ориентации директора. Время экспозиции одного сектора составляло 20 секунд. Использовался ЖК ВИН 9 с толщиной слоя  $d = 20$  мкм. Показана возможность возбуждения контролируемого количества оптических вихревых пучков  $N$  с единичным топологическим зарядом, определяемым зарядом пластинки  $q$  как  $N = 2q$ .

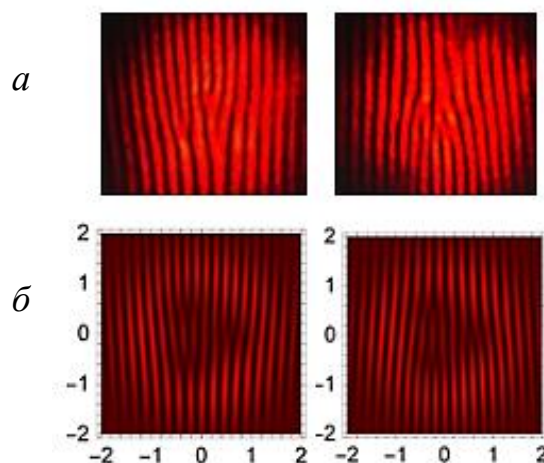
В разделе 7.3 проведены экспериментальные исследования электрооптических свойств ЖК  $q$ -пластинок с фазовым ядром с топологическим зарядом  $q=0,5$ ,  $q=1$ ,  $q=1,5$ . Показано, что в полуволновом режиме работы элементы формируют сингулярные световые фазовые и поляризационные пучки с  $N = 2q$  сингулярностями.

В разделе 7.4 изложена теоретическая модель фазово-поляризационного преобразования света разработанными ЖК элементами, учитывающая эффект влияния несингулярной компоненты (гауссов пучок), прошедшей через область фазового ядра  $q$ -пластинки на поле оптической сингулярности в приближении мод Лагерра-Гаусса. В подразделе 7.4.1 приведены результаты экспериментальных исследований и теоретического расчета распределения интенсивности и топологии поляризации в профиле векторного вихря, формируемого  $q$ -пластинкой с зарядом  $q = 1,5$ , которые находятся в отличном соответствии (рисунок 7). В подразделе 7.4.2 приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения интенсивности и фазы светового пучка, образованного в результате спин-орбитального преобразования света с круговой поляризацией, прошедшего ЖК элемент с зарядом  $q=1,5$ . На рисунке 8 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования фазовой топологии сформированных сингулярных пучков на основе интерференционного анализа.

Изменение знака спинового момента циркулярно поляризованного света, входящего в элемент, приводит к изменению знака топологических зарядов образованных трех фазовых сингулярностей на профиле пучка.



**Рисунок 7 – Расчетные (а) и экспериментальные (б) картины распределения интенсивности преобразованного света. Слева направо: в отсутствие анализатора, с анализатором, ориентированным параллельно и перпендикулярно направлению вектора напряженности излучения**

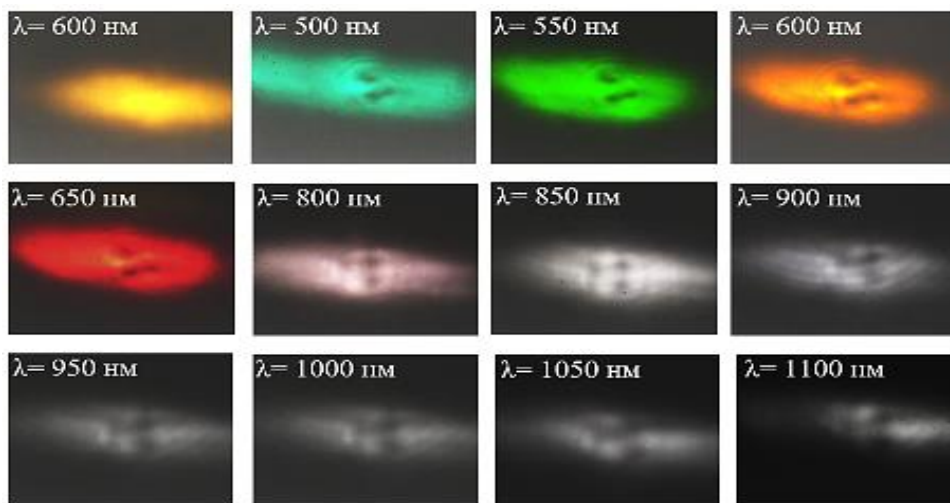


**Рисунок 8 – Экспериментальные (а) и расчетные (б) картины интерференции фазового сингулярного пучка с плоской опорной волной**

**Глава 8** посвящена разработке и созданию электрически управляемых микроструктурированных твист ЖК элементов для возбуждения фазовых и поляризационных сингулярных световых пучков, не требующих точной электрической подстройки под спектральную компоненту лазерного излучения. В **разделе 8.1** описан ЖК твист преобразователь радиальной и азимутальной поляризации (ARCoptix Switzerland) и обоснована необходимость исследования электрооптических свойств микроструктурированных твист ЖК для оптимизации режима формирования сингулярных световых пучков.

В **разделе 8.2** представлены результаты экспериментальных исследований по разработке ЖК твист микроструктурированных элементов (QT) с фазовым ядром и проведен анализ электрически управляемых режимов их работы. Толщина ЖК слоя ВИН 9 составляла  $d = 20$  мкм. Описана топология ЖК твист элементов с величиной топологического заряда  $q = 0,5$ ,  $q = 1$ ,  $q = 1,5$ , методика их создания, основанная на использовании азокрасителя AtA-2 для задания микроструктурированной ориентации ЖК на одной из подложек и фотополимера, чувствительного в ультрафиолетовой области для задания однородной планарной ориентации на второй подложке. Экспериментальные исследования электрооптических свойства созданных QT, демонстрируют возможность формирования фазовых и поляризационных сингулярных пучков в широком спектральном диапазоне.

В разделах 8.3 и 8.4 представлены результаты экспериментальных исследований по анализу поляризационной и фазовой структуры световых пучков, преобразованных твист жидкокристаллическими элементами с топологическим зарядом  $q = 1$  и  $q = 1,5$  при различных условиях электрического управления на основании которых были определены режимы их работы. Предварительный режим: 0 В – 2,3 В - не представляет научно-практического интереса. Режим формирования сингулярного поляризационного/фазового пучка: 2,4 В – 4,5 В. Режим гауссового светового пучка: более 4,5 В. Продемонстрирована возможность возбуждения сингулярных пучков в широком спектральном диапазоне (рисунок 9).



**Рисунок 9– Распределение интенсивности в профиле исходного лазерного пучка ( $\lambda = 600$  нм) и поляризационных сингулярных световых пучков на различных длинах волн ( $U = 3$ В)**

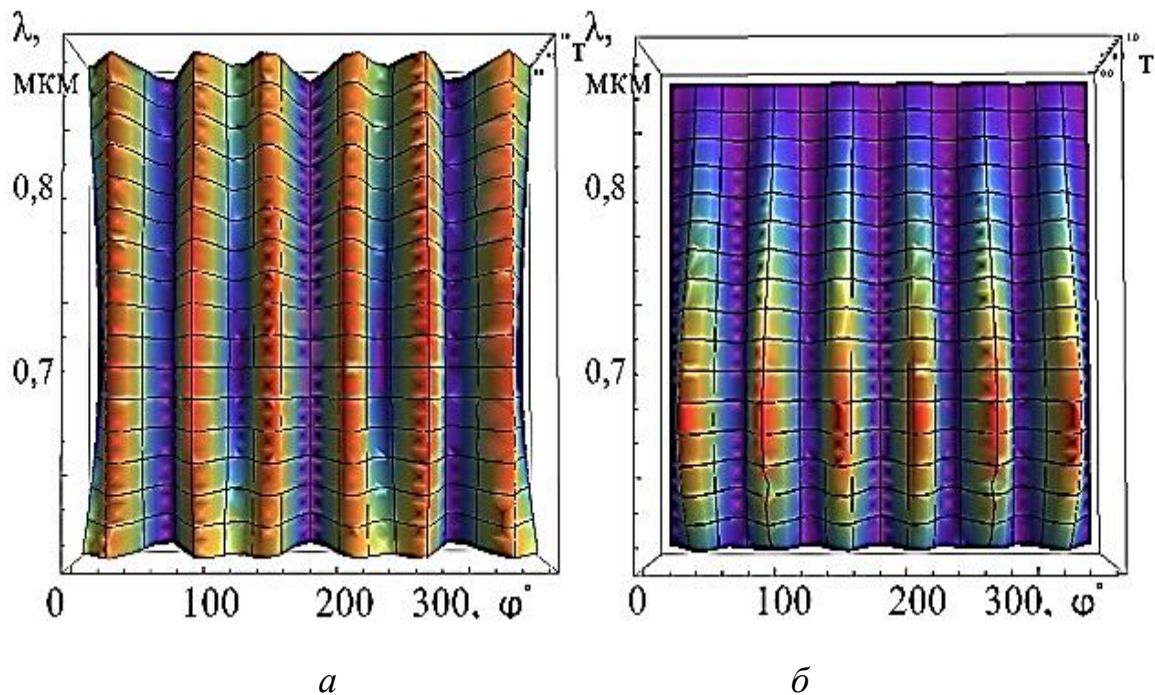
В разделе 8.5 на примере твист ЖК элемента с топологическим зарядом  $q = 1,5$  проведены экспериментальные исследования преобразования фазовой топологии вихревых пучков, прошедших через элемент. Продемонстрирована возможность увеличения и уменьшения топологического заряда оптического вихря в зависимости от геометрии входа света в твист ЖК элемент.

В разделе 8.6 представлены результаты экспериментальных исследований по реализации переключения режимов оптического захвата и вращения микрочастиц в схеме оптического пинцета при электрическом контроле преобразования фазовой топологии оптического вихря ( $l = +8$ ) при прохождении ЖК твист элемента с топологическим зарядом  $q = 1,5$  ( $l = +8 + 3 = +11$ ). При плотности мощности порядка  $0,16$  МВт/см<sup>2</sup> оптического вихря с топологическим зарядом  $l = +8$  на длине волны генерации полупроводникового лазера  $\lambda = 650$  нм происходил захват микрочастиц (сила ловушки  $0,2$  пН). При переключении предложенного твист ЖК элемента в



режим фазовой сингулярности топологический заряд оптической ловушки увеличивался до  $l = +11$  и захваченные частицы начинали вращаться со скоростью  $0,11 \text{ с}^{-1}$ .

В разделе 8.7 проведен теоретический анализ электрооптических свойств твист элементов основанный на представлении ЖК элемента как совокупности ретардера, обеспечивающего набег оптической фазы, и ротатора, определяющего поворот плоскости поляризации излучения на основе расчета зависимостей пропускания базисных ЖК структур ( $S$  – эффект и твист эффект) на длине волны  $633 \text{ нм}$  от приложенного напряжения. На основе матричного метода Джонса проведен расчет оптических характеристик QT и показано, что в отличие от классической  $q$ -пластинки QT в диапазоне напряжений  $3 \text{ В} – 7 \text{ В}$  представляет собой два независимых подслоя, каждый из которых функционирует как фазовая пластинка с ориентацией оптической оси, определяемой граничными условиями распределения директора на подложках элемента (азимутальный угол ориентации директора). Такой режим обеспечивает ахроматические условия формирования сингулярных пучков, в широком спектральном интервале, в то время как  $q$ -пластинки характеризуется сильной спектральной зависимостью (рисунок 10).



**Рисунок 10 – Зависимость пропускания ЖК элементов в скрещенных поляризаторах от длины волны и угла ориентации 2-ого подслоя:**  
 **$a$  – Q-твистер при двулучепреломлении подслоев  $(\Delta nd)_1 = (\Delta nd)_2 \approx 0,34$  мкм,  $U=3 \text{ В}$ ;  $b$  –  $q$ -пластина,  $\Delta nd= 0,34$  мкм**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны технологии создания жидкокристаллических композитов, активированных красителями, на основе которых предложены новые схемные решения ограничения мощности лазерного излучения на длине волны 532 нм и управления дифракционной эффективностью динамических голограмм. Показано, что использование полиметинового красителя ПК7022 позволило уменьшить толщину лимитирующего слоя до 20 мкм при обеспечении порога срабатывания устройства на уровне 1 мДж. Использование композитов «ЖК ВИН 9–родамин 6Ж» и «ЖК ВИН 9–ПК 7098» обеспечило электрическое управление дифракционной эффективностью динамических голограмм, записанных в ЖК ячейке [1, 4, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 64, 65, 68, 70].

2. Определены условия реализации эффекта полного внутреннего отражения на рефрактивной границей, образованной двумя доменами в планарном слое нематического ЖК со взаимно ортогональной ориентацией директора, и реализовано пространственное разделение ортогонально поляризованных световых пучков при напряженностях внешнего электрического поля на уровне сотен мВ/мкм [6, 9, 20, 21, 41].

3. Оптимизирована технология создания рефрактивной границы на основе метода фотоориентации азокрасителя AtA 2 и реализовано электрическое управление направлением распространения линейно поляризованного лазерного излучения, а также переключение поляризованных мод. Предложено использовать эффект пространственного сдвига рефрактивной границы под действием электрического поля для линейного и углового смещения траектории отраженного светового пучка (расстояние порядка 10 мкм, угол в несколько мрад). Созданные элементы обладают высокими техническими характеристиками ЖК (параметр оптического качества не менее 0,9 и потери на распространение менее 1 дБ/мм) [7, 12, 14, 19, 20, 21, 23, 40, 44, 47, 54, 55, 58, 60, 76].

4. Предложена новая твист-планарная начальная ориентации директора в ЖК ячейке, обеспечивающая поляризационно чувствительный режим волноводного распространения излучения в видимом диапазоне спектра. Созданы ЖК элементы со структурированными электродами, в которых оптические волноводы индуцируются внешним электрическим полем. Проведен экспериментальный и теоретический анализ условий возбуждения и электрического управления волноводным режимом для поляризованного лазерного излучения. Созданы макеты ЖК элементов, позволяющие осуществлять передачу оптических сигналов по волноводным каналам в режимах оптического разветвления и суммирования [8, 10, 13, 15, 22, 23, 45, 46,

51, 52, 59, 72, 73, 75].

5. Экспериментально реализовано возбуждение пространственного экранирующего солитона в фоторефрактивном кристалле титаната висмута в диапазон мощности лазерного излучения  $\sim 10$  нВт – 1 мкВт при пороговом значении напряженности внешнего электрического поля более 5 кВ/см [2, 30, 31, 66, 69].

6. Экспериментально определены условия возбуждения пространственных оптических солитонов в нематическом ЖК (нематиконов) и изучены особенности их распространения и взаимодействия в слое НЖК ( $n_o=1,49$ ,  $n_e = 1,67$ ,  $\lambda=0,633$  нм). Определено пороговое значение светоиндуцированного перехода Фредерикса ( $10$  кВт/см<sup>2</sup>), выше которого линейно поляризованное лазерное излучение самоканализируется и распространяется в режиме устойчивого нематикона. Продемонстрирована возможность чисто оптического управления пространственным распространением оптического излучения за счет взаимодействия двух солитонов, возбуждаемых в планарном ЖК слое. Показано, что в зависимости от мощности светового пучка и величины управляющего напряжения в системе связанных ЖК-волноводов реализуется переключение между солитонным режимом и режимом дискретной дифракции светового пучка, что позволяет реализовать функции оптического разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов [16, 17, 18, 53, 74].

7. Разработана технология и создан дифракционный ЖК элемент с начальной твист-планарной ориентацией директора. Установлена зависимость дифракционных характеристик от приложенного напряжения и поляризации падающего света. Показано, что при отсутствии управляющего напряжения дифракционную ЖК структуру можно рассматривать в виде двух тонких поляризационно независимых амплитудных решеток с прямоугольным профилем штриха с суммарной дифракционной эффективностью  $\sim 20\%$ . При подаче электрического напряжения (порядка несколько сотен мВ/мкм) имеет место срыв режима Могена и дифракционная структура трансформируется в тонкую фазовую дифракционную решетку с дифракционной эффективностью, близкой к ее предельному значению [3, 5, 7, 11, 25, 33, 37, 42, 48, 49, 50, 67, 70].

8. Определены энергетические и спектральные условия одноступенчатой голографической записи дифракционных оптических элементов (ДОЭ) на основе карбазол содержащих азополимеров, формирующих оптические вихри. Экспериментально исследована топология образованных фазовых сингулярностей и определен диапазон устойчивости оптических вихрей. Созданы экспериментальные образцы «вихревых» ДОЭ, позволяющие работать во всем оптическом диапазоне с плотностью мощности лазерного излучения порядка кВт/см<sup>2</sup> в импульсном режиме. Продемонстрирована эффективность



использования таких элементов в схеме оптического пинцета [24, 28, 62].

9. Разработан и создан электрически управляемый дифракционный ЖК элемент с вилочной дислокацией для возбуждения сингулярных световых пучков в видимой и ближней ИК области спектра. Показано, что используемая начальная твист-планарная ориентация директора позволяет получить дифракционную эффективность порядка 20%, которая увеличивается при подаче напряжения, стремясь к максимальному значению 30% [5, 7, 11, 26, 41, 43, 63, 71].

10. На основе метода фотоориентации директора ЖК с использованием азокрасителя AtA-2 создан новый тип  $q$ -пластинок с фазовым ядром, работающих как микроструктурированные полуволновые пластинки, которые позволяют сформировать пучки, несущие массивы заданного количества фазовых и поляризационных сингулярностей единичного топологического заряда. Число сингулярностей  $N$  в сформированном пучке связано с топологическим зарядом ЖК элемента  $q$  как  $N=2q$ . Предложена теоретическая модель, подтверждающая закономерности фазово-поляризационного преобразования гауссовых пучков  $q$ -пластинками с фазовым ядром [27, 56, 57, 61].

11. Создан микроструктурированный твист ЖК элемент ( $q$ -твистер), обеспечивающий ахроматические условия формирования пучков с фазовыми и поляризационными сингулярностями в видимой и ближней ИК области спектра. Экспериментально продемонстрирована возможность контроля знака топологического заряда в зависимости от геометрии ввода излучения в ЖК элемент. Проведен теоретический анализ электрооптических свойств разработанного  $q$ -твистера с учетом проявляемых  $S$  – и твист эффектов и показано, что в отличие от классической  $q$ -пластинки предложенный  $q$ -твистер представляет собой действие двух независимых электроуправляемых ЖК подслоев, позволяющих обеспечить ахроматические условия формирования сингулярных пучков. На основе созданного ЖК элемента экспериментально реализовано контролируемое переключения режимов оптического захвата и вращения микрочастиц в схеме оптического пинцета [26, 29, 56, 57, 61].

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

Диссертационная работа относится к фундаментальным и прикладным научным исследованиям в области фотонных устройств и технологий. Практическая значимость обусловлена использованием электрически управляемых микроструктурированных ЖК элементов для фазово-поляризационных преобразований световых полей. Полученные в работе результаты исследования созданных дифракционных и волноводных структур использовались в Институте химии новых материалов НАН Беларуси и представляют широкий практический интерес в связи с применением электрически управляемых ЖК элементов в разнообразных системах управления

лазерными пучками, включая поляризационные делители и волноводные мультиплексоры. Разработанные методики создания структурированных ЖК элементов и закономерности формирования сингулярных световых пучков могут использоваться и уже использовались в научно-исследовательских целях в Австралийском национальном университете и Институте физики НАН Беларуси. Метод формирования контролируемого количества сингулярностей в профиле пучка получил развитие в совместных работах с сотрудниками Центра квантовой динамики и Центра квантовых вычислений и коммуникационных технологий Университета Гриффита (Брисбен, Австралия). Результаты диссертационной работы использованы на НПРУП «Актив БГУ» для изготовления жидкокристаллических элементов при выпуске партии оригинальных установок для экспериментального тура Международной олимпиады по физике на основе электрически управляемых жидкокристаллических элементов по международному контракту с РГКП «Республиканский научно-практический центр «Дарын», Республика Казахстан и ЗАО «Голографическая индустрия» в процессе разработки технологии создания анизотропных меток при производстве голографических элементов защиты от подделки ценных бумаг и документов, а также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета для специальности лазерная физика и спектроскопия и Командно-инженерном институте МЧС. Созданные в ходе проведения исследований установки и экспериментальные методики использовались также при выполнении заданий ГНТП «Эталоны и научные приборы». По результатам диссертационной работы получено 10 актов о внедрении.

Разработанные технологии создания электрически управляемых микроструктурированных ЖК элементов создают основу разработки более широкого круга устройств современной фотоники и интегральной оптики, позволяя создавать световые пучки с заданной фазово-поляризационной структурой, включая пучки с фазовой и/или поляризационной сингулярностью. Такие пучки востребованы в системах оптического пинцета для реализации контролируемого переключения режимов оптического захвата и вращения микрочастиц, а также для кодирования информации, при использовании топологического заряда и поляризации в качестве информационных параметров, и формирования скрытых изображений, которые одновременно могут совмещать технологию голографической защиты от подделки ценных бумаг и документов с записью числового кода.

## Список публикаций соискателя учёной степени

### Статьи в научных журналах в соответствии с п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Бондарчук, А.С. Запись динамических голограмм в нематическом жидком кристалле, активированном красителем родамин 6Ж / А.С. Бондарчук, Е.А. Мельникова // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2006. - Т. 70, № 9. – С. 1289-1291.

2. Формирование низкоинтенсивных пространственных солитонов в фоторефрактивном кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / Т.В. Габрусева, Е.А. Мельникова, А.П. Сухоруков, А.Л. Толстик // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2006. - Т. 70, № 12. - С. 1745–1747.

3. Управляемые дифракционные жидкокристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, В.В. Могильный, А.И. Станкевич // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, вып. 20. - С. 1-7.

4. Комар, А.А. Оптические лимитеры на основе полиметиновых красителей // А.А. Комар, Е.А. Мельникова // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2009. - № 3. – С. 17-21.

5. Дифракционные жидкокристаллические элементы для формирования вихревых световых полей / А.А. Казак, Л.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2011. - № 1. - С. 3-6.

6. Polarization Separation of Light Beams at the Interface of Two Mesophases / А.А. Komar, М.А. Kurochkina, А.А. Melnikova, А.І. Stankevich, А.Л. Tolstik // Tech. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 37, № 8. – P. 704-706.

7. Operation with Laser Radiation by Using of Liquid Crystal Elements / А.А. Kazak, А.Л. Tolstik, Е.А. Melnikova, А.А. Komar // Nonlinear Phenom. in Complex Syst. – 2013. – Vol. 16, № 3. – P. 302-308.

8. Электрически управляемые волноводные жидкокристаллические элементы / О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, И.И. Оленская, А.Л. Толстик // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 14. – С. 30–35.

9. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface / А.А. Komar, А.Л. Tolstik, Е.А. Melnikova, А.А. Muravsky // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, № 16. – P. 5130-5135.

10. Оленская, И.И. Жидкокристаллические волноводные элементы с различной топологией модуляции границы раздела рефрактивных областей

/ И.И. Оленская, О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 87-91.

11. Formation of Singular and Bessel Light Beams using Electrically Controlled Liquid Crystal Diffractive Elements / A.A. Kazak, E.A. Melnikova, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2015. – Vol. 18, № 2. – P. 1–6.

12. Мельникова, Е.А. Полное внутреннее отражение на границе раздела двух ориентаций директора жидкого кристалла / Е.А. Мельникова, И.И. Рушнова // Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2016. - № 2. – С. 3–7.

13. Мельникова, Е.А. Поляризационно-чувствительные волноводные каналы в нематическом жидком кристалле / Е.А. Мельникова, О.С. Кабанова // Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2016. – № 2. – С. 48-51.

14. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals / E.A. Melnikova, A.L. Tolstik, I.I. Rushnova, O.S. Kabanova, A.A. Muravsky // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, № 23. – P. 6491-6495.

15. Электрически контролируемые анизотропные жидкокристаллические волноводы / И.А. Гончаренко, О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, О.Г. Романов, И.И. Рушнова, А.Л. Толстик // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 2. – С. 4-9.

16. Rushnova, I.I. Formation, Propagation, and Interaction of Nematicons / I.I. Rushnova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2017. – Vol. 20, № 1. – P. 82 – 88.

17. Linear and Nonlinear Light Beam Propagation in Liquid-Crystal Waveguide Arrays / O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, O.G. Romanov, A.L. Tolstik // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2017. – Vol. 20, № 4. – P. 319-326.

18. Кабанова, О.С. Распространение света в системе связанных оптических жидкокристаллических волноводов / О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. - 2018. – № 1. – С. 18-24.

19. Рушнова, И.И. Электрически контролируемое распространение лазерного излучения на основе ЖК элементов / И.И. Рушнова, Е.А. Мельникова // Журн. Белорусск. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 1. – С. 41-50.

20. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave / I.I. Rushnova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik, A.A. Muravsky // Optics Communications. – 2018. – Vol. 413. – P. 179-183.

21. Integrated-Optical Nematic Liquid Crystal Switches: Designing and Operation Features / I.I. Rushnova, O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2018. – Vol. 21, № 3. – P. 206-219.

22. Двумерная дифракционная оптическая структура на основе текстурированной фотоориентации полимеризуемого жидкого кристалла / О.С. Кабанова, И.И. Рушнова, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, Ал.А. Муравский, Ан.А. Муравский, Р. Хайнцманн // *Журнал Белорусск. гос. ун-та. Физика*. – 2019. - № 3. – С. 4-11.

23. Fringe field-tunable LC refractive index interface for in-plane beam steering applications / I.I. Rushnova, E.A. Melnikova, O.S. Kabanova, A.L. Tolstik, A.A. Muravsky // *Appl. Opt.* - 2020. - Vol. 59, № 34. - P. 10695-10699.

24. Optical Vortices Generation by Azopolymeric Relief Gratings / E.A. Melnikova, D.V. Gorbach, I.I. Rushnova, V.S. Kabanova, S.S. Slusarenko, A.L. Tolstik, C. Losmanschii, A. Meshalkin, E. Achimova // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. - 2021. - Vol. 24, № 1. - P. 104-111.

25. Polarization Properties of the Electrically Controlled Twist-Planar Liquid Crystal Diffraction Structure / E. Melnikova, I. Stashkevich, I. Rushnova, A. Tolstik, S. Timofeev // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2022. –Vol. 25, № 3. – P. 229-247.

26. Мельникова, Е.А. Электрически контролируемые микроструктурированные жидкокристаллические твист-элементы для фазового преобразования световых полей / Е.А. Мельникова // *Оптический журнал*. – 2022. – Т. 89, № 3. – С. 68-78.

27. Liquid-crystal q-plates with a phase core to generation vortex beams with controllable number of singularities / E. Melnikova, D. Gorbach, S. Slussarenko Sr., A. Muravsky, A. Tolstik, S. Slussarenko Jr. // *Optics Communications*. – 2022. – Vol. 522. – P. 128661 (1-8).

28. Patterned photoalignment-based one- and two-dimensional liquid crystal forked gratings / O.S. Kabanova, I.I. Rushnova, D.V. Gorbach, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2022. –Vol. 25, № 1. – P. 73–82.

29. Ахроматическая переключаемая жидкокристаллическая твист-q-пластинка / Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, Д.В. Горбач, В.Ю. Станевич, И.Н. Кухто, Д.С. Чепелева, Ан.А. Муравский, Ал.А. Муравский // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2023. - Т. 90, № 2. - С. 338-347.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

30. Multiwave mixing and soliton-like spatial structures in photorefractive crystals / A.L. Tolstik, N.G. Borzdov, A.Yu. Matusевич, E.A. Melnikova,

A.P. Sukhorukov // Proceedings of SPIE. - 2005. -Vol. 5949 : Congress on optics and optoelectronics, Warshava, Poland, 28 august – 2 september 2005 / Nonlinear Optics Applications ; ed. Karpierz M.A. [et al.]. - P. 59491P-1-8.

31. Динамика формирования фоторефрактивного отклика и пространственные солитоны в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  / А.Л. Толстик, Н.Г. Борздов, А.Ю. Матусевич, Е.А. Мельникова, А.П. Сухоруков // Труды X Всероссийской школы-семинара «Волны-2005», Москва, 23-28 мая 2005 г. / МГУ. – Москва, 2005 - С. 25-26.

32. Бондарчук, А.С. Управляемые дифракционные элементы на основе нематического жидкого кристалла, активированного красителем / А.С. Бондарчук, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Лазерная физика и оптические технологии: материалы VI Междунар. конф., Гродно, 25-29 сентября 2006 г. В 2 ч. / Гродн. гос. ун-т; редколл.: Н.С. Казак [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2006. - Ч. 1. - С. 130–132.

33. Казак, А.А. Оптоэлектронные жидкокристаллические элементы с управляемой дифракцией / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Труды XI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» («Волны-2007»), Москва, Звенигород, 21-26 мая 2007 г. – М., 2007. – Ч. 2.- С. 36 – 38.

34. Optical limiters for laser radiation based on reverse saturable polymethine dyes / А.А. Komar, А.А. Lugowskii, Е.А. Melnikova, V.M. Samtsov, А. Tolstik // Proc. of SPIE. – 2007. – Vol. 6728 : ICONO 2007: Novel Photonics Materials; Optics and Optical Diagnostics of Nanostructures, Minsk, Belarus, 28 may – 1 June 2007 / Ed. by О.А. Akstipetrov [et al.]. -P. 67283K-1-8.

35. Оптические лимитеры лазерного излучения на основе растворов и жидкокристаллических композиций полиметиновых красителей / А.А. Комар, Е.А. Мельникова, М.П. Самцов, А.Л. Толстик // VII Междунар. науч. конф. «Лазерная физика и оптические технологии» : сб. науч. тр. конф., Минск, 17-19 июня 2008 г. В 3 т. / НАН Беларуси, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ, РФФИ, Бел. физич. о-во; под ред. Н.С. Казака [и др.]. – Минск, 2008. - Т. II. - С. 12–15.

36. Влияние природы растворителя на оптические свойства индотрикарбоницианиновых красителей / М.П. Самцов, Е.А. Мельникова, В.Л. Дубовский, Д.Г. Мельников, В.А. Светличный // VII Международная научная конференция «Лазерная физика и оптические технологии»: сб. науч. тр. конф., Минск, 17-19 июня 2008 г. В 3 т. / НАН Беларуси, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БРФФИ, РФФИ, Бел. физич. о-во; под ред. Н.С. Казака [и др.]. – Минск, 2008. - Т. III. - С. 208-211.

37. Управляемая дифракция на тонких решетках, сформированных в жидкокристаллических композитах / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, В.В. Могильный, А.И. Станкевич // VIII Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2008», С.-Петербург, 20-24 окт. 2008 г. / Оптич. о-во имени Д.С. Рождественского, Гос. оптич. ин-т имени С.И. Вавилова, С.-Петербургский гос. ун-т информац. технологий, механики и оптики, ОАО «ЛОМО», С.-Петербургская Секция «Оптика» Дома ученых РАН. - Санкт-Петербург, 2008. - Т. 2. - С. 172–174.

38. Комар, А.А. Лимитирующие свойства полиметиновых красителей в растворах и жидких кристаллах / А.А. Комар, Е.А. Мельникова, М.П. Самцов // Сборник научных трудов II Конгресса физиков Беларуси, Минск, 3-5 ноября 2008 г. Посвящается 80-летию со дня основания Национальной академии наук Беларуси / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Беларусь, Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Белгосуниверситет, ОО «Белорусское физическое общество», БРФФИ. – Минск, 2008. – С. 55-56.

39. Kazak, A. Controlled diffraction elements based on liquid crystal composites / A. Kazak, E. Melnikova, A. Tolstik // Proceedings of 4-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2008), Alushta, Crimea, Ukraine, 29 September – 4 October 2008 / Ed. I.A. Sukhanov. – IEEE, 2008. - P. 401–403.

40. Light Beam Control by Liquid Crystal Interfaces / А.А.Комар, М.А. Kurochkina, Е.А. Melnikova, Y.I. Miksyuk, А.И. Stankevich, А.Л. Tolstik // International Conference “Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences” (OTN4MLS-2010), Minsk, June 15-19, 2010. In 2 vol. / National Academy of Sciences of Belarus, B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. - Minsk, 2010. - Vol. 1 (Sections 1-6). - P. 200-206.

41. Формирование сингулярных оптических пучков с помощью дифракционных жидкокристаллических элементов / А.А. Казак, Л.А. Казак, А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова // Сборник трудов IX Междунар. конф. «Прикладная оптика-2010», Санкт-Петербург, 18-22 октября 2010 г. / Гос. оптич. ин-т им. С.И. Вавилова; под ред. Л.Н. Архиповой [и др.]. - С.-Петербург, 2010. - Т. 1. - С. 220–223.

42. Поляризационные особенности дифракции света на ЖК структурах / А.А. Казак, Л.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2011», Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011 г. / Мин. обр. и науки РФ, С.-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики. – С.-Петербург, 2011. - С. 33–36.

43. Казак, А.А. Применение дифракционных ЖК элементов для записи скрытых изображений / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Сборник трудов VII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2012», С.-Петербург, 15-19 октября 2012 г. / Мин. обр. и науки РФ, С.-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики. – С.-Петербург, 2012. - С. 532–533.

44. Полное внутреннее отражение на границе раздела двух мезофаз в нематическом жидком кристалле / О.С. Кабанова, А.А. Комар, Е.А. Мельникова, И.И. Оленская // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. - 2013. - № 5 : Труды школы-семинара «Волны-2013», Звенигород, Московская обл., 20-23 мая 2013 г. / World Data Center. - С. 135039-1-4.

45. Волноводное распространение излучения в электрически управляемых ЖК-структурах / Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, О.С. Кабанова, И.И. Оленская // Квантовая электроника: материалы IX Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-21 ноября 2013 г. / Белорус. гос. ун-т, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 8-10.

46. Волноводный режим распространения света в жидкокристаллических элементах с различной топологией модуляции границы раздела мезофаз / И.И. Оленская, О.С. Кабанова, А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова // Волновые явления в неоднородных средах: сб. науч. тр. XIV Всероссийской школы-семинара «Волны-2014», Москва, 26–31 мая 2014 г. / МГУ. – Москва, 2014. – Секция 3. – С. 24 – 25.

47. Толстик, А.Л. Жидкокристаллические элементы на основе границы раздела двух мезофаз / А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова // Сборник трудов VIII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2014», С.-Петербург, 20-24 октября 2014 г. / Мин. обр. и науки РФ, С.-Петербургский нац. исслед. ун-т информац. технологий, механики и оптики; под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – С.-Петербург, 2014. - С. 371–373.

48. Поляризационно-фазовые дифракционные структуры на основе фотоориентации жидких кристаллов / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, В.В. Могильный, А.Л. Толстик, А.В. Трофимова // Сборник трудов XI Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2014», С.-Петербург, 21-24 октября 2014 г. / Оптическое общество им. Д.С. Рождественского. – С.-Пб., 2014. - Т. 3. - С. 60–63.

49. Казак, А.А. Управляемые дифракционные структуры на основе фотоориентации жидких кристаллов / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Сборник научных трудов IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Москва, 28-30 января 2015 г.



/ Мин. обр. РФ, РАН, Гос. корпорация по атом. энергии «РОСАТОМ», Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ». - Москва, 2015. - С. 234–235.

50. Адамович, Ю.Ю. Управление фазово-поляризационными характеристиками лазерных пучков с помощью жидкокристаллических элементов / Ю.Ю. Адамович, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // V Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 27-30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., И-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ. – Минск, 2015. - С. 61–62.

51. Пространственно структурированные жидкокристаллические элементы для задач интегральной оптики / О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, И.И. Рушнова, А.Л. Толстик // V Конгресс физиков Беларуси : сб. науч. тр., Минск, 27-30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., И-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ. – Минск, 2015. - С. 215–216.

52. Methods of Creation and Optimization of Anisotropic Liquid–Crystal Photonic Structures / I.A. Goncharenko, O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, O.G. Romanov, I.I. Rushnova, A.L. Tolstik // Proceedings of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON 2016, Trento, Italy, July 10 – 14, 2016 / IEEE. – Trento, 2016. – P. 1– 5.

53. Взаимодействие световых пучков в планарном нематическом жидкокристаллическом слое / О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, И.И. Рушнова, А.Л. Толстик // Сборник трудов IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО-2016), С.-Петербург, 17-21 октября 2016 г. / Международный оптический конгресс «Оптика». - Санкт-Петербург, 2016. - С. 290–292.

54. Рушнова, И.И. Электрически контролируемое направление света в ЖК элементах / И.И. Рушнова, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // VI Конгресс физиков Беларуси, Минск, 20-23 ноября 2017 г. : сб. науч. тр. / Институт физики НАН Беларуси, БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ, НТА «Оптика и лазеры»; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. - Минск, 2017. – С. 160-161.

55. Рушнова, И.И. Пространственное микросканирование световым пучком в НЖК ячейках / И.И. Рушнова, Е.А. Мельникова // X Междунар. конфер. молодых ученых и специалистов «Оптика-2017» : сб. тр., С.-Петербург, 16-20 октября 2017 г. / Университет ИТМО. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 431-432.

56. Формирование сингулярных световых пучков с заданной топологией поляризации на основе микроструктурированных ЖК элементов / Е.А. Мельникова, М.В. Бобкова, В.В. Пекаревич, А.Л. Толстик // Тезисы докладов XV междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим

технологиям, Москва, 11-13 сентября 2018 г. / МГТУ имени Н.Э. Баумана, ООО «Микро и наноголографические системы». – Москва, 2018. – С. 247-251.

57. Фазово-поляризационные преобразования световых пучков динамическими голограммами и жидкокристаллическими элементами / А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова, Д.В. Горбач, М.В. Бобкова, В.В. Пекаревич // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 23-25 января 2019 г. / Мин. науки и высшего обр. РФ, РАН, Гос. корпорация по атом. Энергии «РОСАТОМ», Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ»; отв. ред. В.Г. Родин. – М., 2019. – С. 161–162.

58. Интегрально-оптический двухдоменный жидкокристаллический дефлектор [Электронный ресурс] / И.И. Рушнова, О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Сб. тр. XVII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова, г. Можайск Московской обл., 26-31 мая 2019 г. / МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Рос. фонд фундамент. исслед., под общ. ред. А.Н. Калиша. – С. 72-75. – Режим доступа: <http://photonics.phys.msu.ru/waves/files/docs/2019/thesis/Section6.pdf>. – Дата доступа: 18.05.2023.

59. Nematic Liquid Crystal Waveguides for Spatial Control of Linearly Polarized Light Waves [Electronic resource] / V.S. Kabanava, I.I. Rushnova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // Proc. of the 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS - SPRING), Rome, Italy, June 17–20, 2019 / Institute of Electromagnetics Research Symposium - Rome: Spring, 2019. – P. 3832–3835. – Mode of access :<https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/251277/1/kabanava2019.pdf>. – Date of access: 18.05.2023.

60. Low-voltage light beam steering by planar dual-domain nematic liquid crystal deflector / I.I. Rushnova, O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL\*2019): conference proceedings, September 6-8, 2019. - Sozopol, Bulgaria, 2019. – P. 79-82.

61. Мельникова, Е.А. Электрически управляемые топологические ЖК элементы для формирования оптических вихрей / Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик // Сборник трудов XII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2020», С.-Петербург, 19-23 октября 2020 г. / Мин. обр. и науки РФ, Университет ИТМО; под ред. С.А. Козлова. - С.-Петербург, 2020. – С. 183–184.

62. Топологический дифракционный элемент на основе азополимера / Е.А. Мельникова, О.С. Кабанова, И.И. Рушнова, А.Л. Толстик, Е. Акимова, К. Лошманский, А. Мешалкин // Сборник трудов XII Междунар. конф.

«Фундаментальные проблемы оптики» ФПО–2020, С.-Петербург, 19-23 октября 2020 г. / Университет ИТМО. – С.-Петербург, 2020. – С. 185-187.

63. Мельникова, Е.А. Электрически контролируемые жидкокристаллические элементы для поляризационно-фазового преобразования световых полей / Е.А. Мельникова // Тезисы докладов XVIII Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO 2021), Геленжик, 21-22 сентября 2021 г. / Моск. гос. технич. ун-т имени Н.Э. Баумана (Нац. исслед. ун-т), ООО «Оптико-голографические приборы». – М., 2021. – С. 264–268.

### Тезисы докладов

64. Melnikova, E. Control of the diffraction efficiency of dynamic holograms in doped liquid-crystal elements [Electronic resource] / E. Melnikova, A. Bondarchuk // Abstracts of the 6-th International Conference on Electronic Processes in Organic Materials «ICEPOM-6». Gurzuf, Crimea, Ukraine, 25-29 September 2006 / Ukrainian Academy of Sciences, Kiev Inst. Of Physics, by ed.: dr. Verts Ya. - P. 93-94. – Mode of access: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA463192.pdf>. – Date of access: 18.05.2023.

65. Бондарчук, А.С. Обращение волнового фронта в нематическом жидком кристалле, активированном красителем / А.С. Бондарчук, Е.А. Мельникова // Сб. тр. IV Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики», Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006 г. / Международный оптический конгресс «Оптика – XXI век»; под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. - СПб., 2006. - С. 139-140.

66. Мельникова, Е.А. Условия образования низкоинтенсивных фоторефрактивных солитонов в кристаллах семейства силленитов / Е.А. Мельникова, Ю.И. Миксюк, А.Л. Толстик // Сб. тр. IV Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2006», Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006 г. / Международный оптический конгресс «Оптика – XXI век»; под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. - СПб., 2006. - С. 168-169.

67. Оптоэлектронные жидкокристаллические элементы с управляемой дифракцией на основе полимерного фотоориентанта / А.А. Казак, Е.А. Мельникова, В.В. Могильный, А.И. Станкевич, А.Л. Толстик // Материалы VII Междунар. науч.-технич. конф. «Квантовая электроника», Минск, 13-16 октября 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси ; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Мн.: Академия управления при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – С. 28.

68. Лимитирующие свойства оптических ограничителей на основе полиметиновых красителей / А.А. Комар, Е.А. Мельникова, М.П. Самцов, А.Л. Толстик // Материалы VII Междунар. науч.-технич. конф. «Квантовая электроника», Минск, 13-16 октября 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. –Мн.: Академия управления при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – С. 33.

69. Влияние спектральных и временных характеристик лазерного излучения на формирование волноводных структур в кристаллах семейства силленитов / Е.А. Мельникова, Ю.И. Миксюк, К.А. Саечников, А.Л. Толстик // Материалы VII Междунар. науч.-технич. конф. «Квантовая электроника», Минск, 13-16 октября 2008 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ, НИИ ПФП имени А.Н. Севченко, БРФФИ, Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси ; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. –Мн.: Академия управления при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – С. 143.

70. Kazak, A.A. Electrically-controlled structures based on liquid crystals and photoaligning polymers / A.A. Kazak, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // Abstracts of International Conference «Functional Materials» ICFM`2009, Partenit, Crimea, Ukraine, 5-10 October 2009 / Taurida National V.I. Vernadsky University. - Simferopol, 2009. – P. 213.

71. Использование жидкокристаллических элементов для формирования сингулярных оптических пучков / А.А. Казак, Л.А. Казак, А.Л. Толстик, Е.А. Мельникова // Квантовая электроника: материалы VIII Междунар. научно-технич. конф., Минск, 22-25 ноября 2010 г. / Редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. - С. 27.

72. Waveguide Light Propagation in Electrically Controlled Liquid-Crystal Elements / O.S.Kabanova, I.I.Olenskaya, A.L.Tolstik, E.A.Melnikova // XVII International Conference – School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and II International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics», Minsk, September 29 – October 3, 2014 / Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian State University, ed. by A.L. Tolstik, L.F. Babichev, D.W. Serow. – S.-Petersburg, 2014. - P. 48.

73. Liquid-crystal photonic structures with the electrically-controlled optical anisotropy / O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, O.G. Romanov, I.A. Goncharenko, A.L. Tolstik // XVIII International Conference & School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and III International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics», Minsk, Belarus, September 27 – October 1 2016: Programme & Book of Abstracts / Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian State

University, ed. by A.L. Tolstik, G.G. Krylov, D.W. Serow. – S.-Petersburg, 2016. - P. 65.

74. Rushnova, I. Nematicons Formation and Interaction / I. Rushnova, E. Melnikova, A. Tolstik // XVIII International Conference & School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» and III International Symposium «Advances in Nonlinear Photonics», Minsk, Belarus, September 27 – October 1 2016: Programme & Book of Abstracts / Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian State University, ed. by A.L. Tolstik, G.G. Krylov, D.W. Serow. – S.-Petersburg, 2016. - P. 65-66.

75. Kabanava, V. Propagation of light beams in microstructured nematic liquid crystals [Electronic resource] / V.Kabanava, E.Melnikova, A.Tolstik // Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference: book of abstracts, Barcelona, 13-15 September 2017. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/322339288\\_Propagation\\_of\\_light\\_beams\\_in\\_microstructured\\_nematic\\_liquid\\_crystals](https://www.researchgate.net/publication/322339288_Propagation_of_light_beams_in_microstructured_nematic_liquid_crystals). – Date of access: 18.05.2023.

76. Electrically Switchable Planar Liquid-Crystal Elements For Applications Of Integrated Photonics / O.S. Kabanova, I.I. Rushnova, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // Proceedings of International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020), St.-Peterburg, November 2-6 2020 / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – St. Petersburg, 2020. – P. 369.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Green', is located in the lower right quadrant of the page.

## РЕЗЮМЕ

Мельникова Елена Александровна

### ФАЗОВО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, переход Фредерикса, полное внутреннее отражение, оптические переключатели, оптические волноводы, дифракционные оптические элементы, q-пластинки, сингулярные световые пучки.

Цель работы: разработка новых методов фазово-поляризационного преобразования световых полей на основе электрически управляемых микроструктурированных жидкокристаллических (ЖК) элементов, включающих дифракционные и волноводные структуры, q - пластинки, позволяющие реализовать функции поляризационных делителей, мультиплексоров, микросканеров и создавать сингулярные световые пучки с заданной фазово-поляризационной структурой.

Методы исследования: экспериментальный и теоретический анализ пространственной, фазовой и поляризационной структуры световых пучков, включая интерференционный и поляризационный анализ, формализм матриц Джонса.

Полученные результаты и их новизна. Определены условия полного внутреннего отражения на рефрактивной границе, образованной двумя доменами в планарном слое нематического ЖК со взаимно ортогональной ориентацией директора, реализованы режимы волноводного распространения и пространственного поляризационного разделения световых пучков. Установлены закономерности фазово-поляризационного преобразования световых пучков микроструктурированными ЖК элементами. Разработаны технологии и созданы новые электрически управляемые ЖК элементы, выполняющие функции переключения направления распространения линейно поляризованного света, передачу оптических сигналов по волноводным каналам, режимы оптического разветвления и суммирования, формирования сингулярных пучков с заданной фазовой и поляризационной топологией.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты исследований применены для решения задач современной фотоники и интегральной оптики, включая создание поляризационных делителей и волноводных мультиплексоров, формирование пучков с фазовой или поляризационной сингулярностью, кодирование информации при использовании топологического заряда в качестве информационного параметра, разработку голографических защитных элементов.

## РЭЗІЮМЭ

Мельнікава Алена Аляксандраўна

### ФАЗАВА-ПАЛЯРЫЗАЦЫЙНЫЯ ПЕРАЎТВАРЭННІ СВЕТЛАВЫХ ПАЛЁЎ МІКРАСТРУКТУРАВАНЫМІ ВАДКАКРЫШТАЛІЧНЫМІ ЭЛЕМЕНТАМІ

Ключавыя словы: нематычны вадкі крышталі, пераход Фрэдэрыкса, поўнае ўнутранае адбіццё, аптычныя пераключальнікі, аптычныя хваляводы, дыфракцыйныя аптычныя элементы, q-пласцінкі, сінгулярныя светлавыя пучкі.

Мэта працы: распрацоўка новых метадаў фазава-палярызацыйнага пераўтварэння светлавых палёў на аснове электрычна кіраваных мікраструктураваных вадкакрышталічных (ВК) элементаў, якія ўключаюць дыфракцыйныя і хваляводныя структуры, q - пласцінкі, якія дазваляюць рэалізаваць функцыі палярызацыйных дзельнікаў, мультыплексаў, мікрасканараў і ствараць сінгулярныя светлавыя пучкі з зададзенай фазава-палярызацыйнай структурай.

Метады даследавання: эксперыментальны і тэарэтычны аналіз прасторавай, фазавай і палярызацыйнай структуры светлавых пучкоў, якія ўключаюць інтэрферэнцыйны і палярызацыйны аналіз, фармалізм матрыц Джонса.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Вызначаны ўмовы поўнага ўнутранага адбіцця на рэфрактыўнай мяжы, ўтворанай двума даменамі ў планарным слоі нематычнага ВК з узаемна артаганальнай арыентацыяй дырэктара, рэалізаваны рэжымы хваляводнага распаўсюджвання і прасторавага палярызацыйнага падзелу светлавых пучкоў. Устаноўлены заканамернасці фазава-палярызацыйнага пераўтварэння светлавых пучкоў мікраструктураваны ВК элементамі. Распрацаваны тэхналогіі і створаны новыя электрычна кіраваныя ВК элементы, якія выконваюць функцыі пераключэння кірунку распаўсюджвання лінейна палярызаванага лазернага выпраменьвання, перадачу аптычных сігналаў па хваляводных каналах, рэжымы аптычнага разгалінавання і падсумоўвання, фармавання сінгулярных пучкоў з зададзенай фазавай і палярызацыйнай тапалогіяй.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: вынікі даследаванняў прыменены для вырашэння разнастайных задач сучаснай фатонікі і інтэгральнай аптыкі, якія ўключаюць стварэнне палярызацыйных дзельнікаў і хваляводных мультыплексаў, фарміраванне пучкоў з фазавай або палярызацыйнай сінгулярнасцю, кадаванне інфармацыі пры выкарыстанні тапалагічнага зараду і палярызацыі ў якасці інфармацыйных параметраў, распрацоўку галаграфічных ахоўных элементаў.

## SUMMARY

Melnikova Elena Aleksandrovna

### PHASE-POLARIZATION TRANSFORMATIONS OF LIGHT FIELDS BY MICROSTRUCTURED LIQUID CRYSTAL ELEMENTS

**Keywords:** nematic liquid crystal, Fredericks transition, total internal reflection, optical switches, optical waveguides, diffraction optical elements, q-plates, singular light beams.

**Objective:** development of innovative methods for phase-polarization transformation of light fields based on the electrically-controlled microstructured liquid crystal (LC) elements, with diffraction and waveguide structures, q - plates, enabling realization of the functions of polarization dividers, multiplexers, microscanners and offering the formation of singular light beams with the desired phase-polarization structure.

**Research methods:** experimental and theoretical analysis of the spatial, phase, and polarization structure of light beams, interference and polarization analysis including, Jones (matrix) formalism.

**Obtained results and novelty.** The conditions of total internal reflection have been determined at the refractive interface formed by two domains within the planar layer of a nematic LC with the mutually-orthogonal director orientations; the modes of waveguide propagation and spatial polarization separation of light beams have been realized. The required technologies have been developed and the innovative electrically-controlled LC elements have been manufactured to perform such functions as switching of the propagation direction for linearly polarized light and transmission of optical signal by waveguide channels, to realize the modes of optical branching and summation, of the formation of singular beams with the desired phase and polarization topology.

**Recommendations for applications and application area:** the results of the performed studies have been applied to solve the problems of modern photonics and integrated optics including the manufacturing of polarization dividers and waveguide multiplexers, the formation of beams with phase and waveguide singularity, the information coding with the use of the topological charge as an information parameter, the development of protective holographic elements.

