

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 532.783; 535.555

КАБАНОВА
Ольга Сергеевна

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В
ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ
НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
СТРУКТУРАХ**

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

Минск, 2018

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете.**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ –

Мельникова Елена Александровна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры лазерной физики
и спектроскопии
Белорусского государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Шепелевич Василий Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической физики
и прикладной информатики
УО «Мозырский государственный педагогический
университет им. И.П. Шамякина»;

Трофимова Александра Владимировна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры общей физики
Белорусского государственного университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

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

Защита состоится **15 июня 2018 года** в **15.00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул.Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» мая 2018 года.

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

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Жидкокристаллические (ЖК) материалы нашли широкое применение в области разработки и создания оптических устройств, принцип действия которых основан на проявлении линейных и нелинейных оптических эффектов. В последнее десятилетие для решения научно-исследовательских и прикладных задач интегральной оптики большой интерес представляют волноводные нематические жидкокристаллические (НЖК) структуры, осуществляющие пространственно-поляризационное управление световыми сигналами в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Использование ЖК-материалов в области сердцевины или оболочки волновода позволяет осуществить модуляцию и переключение световых пучков на основе электрооптического и (или) нелинейно-оптического эффектов, что обеспечивает возможность перестройки оптических параметров волноводных ЖК-устройств при помощи внешних электрических и (или) оптических полей. Тематика актуальных исследований в данной области охватывает широкий круг вопросов, связанных с выбором оптимальных ЖК-материалов, развитием технологий ориентирования ЖК на поверхности, совершенствованием методов проектирования и изготовления волноводных ЖК-структур с целью упрощения процесса их интеграции в оптические системы. Экспериментально доказано, что активно развивающиеся технологии оптических ЖК-волноводов являются перспективной платформой для разработки и создания оптических устройств, таких как мультиплексоры, оптические переключатели, интерферометры, лазеры, интегрально-оптические поляризаторы, перестраиваемые оптические фильтры и др.

В настоящее время актуальной задачей является разработка новых геометрий волноводных ЖК-структур для создания оптических устройств с расширенными функциональными характеристиками. В большинстве публикаций, посвященных ЖК-волноводам, анализируется преимущественно стандартные волноводные геометрии, предусматривающие использование в качестве сердцевины (или оболочки) слой ЖК-материала с гомогенной ориентацией директора. В то же время мало изученным остается вопрос, связанный с возможностью реализации волноводных свойств в ЖК-структурах, характеризующихся пространственной модуляцией ориентации директора. Данная диссертационная работа посвящена изучению закономерностей распространения линейно поляризованных световых пучков в тонкопленочных волноводных нематических жидкокристаллических структурах с электрически управляемой пространственной модуляцией топологии ориентации директора.

Работа содержит теоретические расчеты, результаты и анализ оригинальных экспериментальных исследований и ориентирована на

практическое использование результатов в области интегральной оптики и нанофотоники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует п. 12 «междисциплинарные исследования» в перечне приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденном Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета. Представленные результаты исследований распространения световых пучков в волноводных электрически управляемых нематических жидкокристаллических структурах получены в рамках выполнения следующих научно-исследовательских тем:

«Разработка методов и технологии создания анизотропных жидкокристаллических фотонных структур и оптимизация их оптических и оптоэлектронных свойств для квантово-оптических приложений» государственной программы научных исследований «Конвергенция», № ГР 20115403, срок выполнения 2011–2015 годы;

Международного проекта БРФФИ совместно с Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова: № Ф14Р-168 «Распространение и взаимодействие световых пучков в неоднородных средах с фоторефракцией», № ГР 20142918, срок выполнения 2014–2016 годы;

«Разработка материалов и технологий создания микроструктурированных жидкокристаллических элементов для фотонных приложений» государственной программы научных исследований «Конвергенция», №ГР 20161428, срок выполнения 2016–2020 годы;

гранта Белорусского государственного университета «Формирование и взаимодействие оптических пространственных солитонов в электрически управляемых жидкокристаллических элементах», срок выполнения 2017 г.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состояла в установлении закономерностей распространения световых пучков в тонкопленочных волноводных нематических ЖК-структурах с электрически управляемой пространственной модуляцией топологии ориентации директора.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- разработать топологию ориентации директора жидкого кристалла в тонкопленочном нематическом ЖК-слое, обеспечивающую реализацию волноводных свойств для линейно поляризованных световых пучков;
- отработать технологии проектирования и изготовления поляризационно-чувствительных волноводных нематических ЖК-структур, характеризующихся электрически управляемой пространственной модуляцией топологии ориентации директора;
- экспериментально реализовать контролируемый режим волноводного распространения световых пучков на основе разработанной волноводной нематической ЖК-структуры;
- на основе двух ортогональных ориентаций директора в области сердцевины и оболочки ЖК-волновода реализовать функции оптического разветвителя и сумматора, путем приложения внешнего пространственно модулированного электрического поля к планарно-ориентированному тонкопленочному нематическому ЖК-слою;
- теоретически и экспериментально определить условия возбуждения и пространственные особенности распространения оптических солитонов в периодической системе электрически индуцируемых нематических ЖК-волноводов.

Объектом исследований были выбраны электрически управляемые нематические ЖК-слои с пространственной модуляцией топологии ориентации директора.

Предметом исследований являлось пространственное управление световыми пучками в электрически управляемых волноводных нематических ЖК-структурах.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана новая многодоменная планарная ортогональная топология ориентации директора, обеспечивающая формирование поляризационно-чувствительных волноводных каналов в тонкопленочном нематическом ЖК-слое;
- разработаны две новые конфигурации пространственно модулированного электрического поля, позволяющие индуцировать в планарно-ориентированном нематическом ЖК-слое волноводные разветвители и сумматоры; созданы макеты миниатюрных электрически управляемых волноводных ЖК-элементов и на этой основе экспериментально реализовано пространственное управление световыми пучками видимой области спектра;

- определены условия реализации нелинейного эффекта самофокусировки и формирования пространственных оптических солитонов в системе электрически индуцируемых ЖК-волноводов;
- впервые реализован режим оптического ЖК-разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов при распространении пространственного оптического солитона в периодической системе нематических ЖК-волноводов в условиях совместного проявления электрооптического и нелинейно-оптического отклика ЖК-среды.

Положения, выносимые на защиту

1. Многодоменная планарная ортогональная ориентация директора жидкого кристалла обеспечивает формирование в тонкопленочном нематическом ЖК-слое периодической системы электрически управляемых поляризационно-чувствительных волноводных каналов.
2. Пространственно модулированное электрическое поле, приложенное к нематическому ЖК-элементу с однородной планарной ориентацией директора, позволяет создавать волноводные ЖК-структуры и реализовать на их основе функции оптического разветвителя и сумматора.
3. Режим оптического разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов реализуется при совместном проявлении электрооптического и нелинейно-оптического отклика периодической системы нематических ЖК-волноводов.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя диссертационной работы к.ф.-м.н. Е.А. Мельниковой состоял в определении общего направления, основных целей и задач исследований, обсуждении полученных результатов. Соавторы научных публикаций д.ф.-м.н. И.А. Гончаренко, к.ф.-м.н. О.Г. Романов занимались разработкой теоретических моделей и участвовали в выполнении теоретических расчетов угла ориентации директора и изменения показателя преломления нематического жидкого кристалла, а также распространения световых пучков в волноводных ЖК-структурах при разных управляющих напряжениях. Д.ф.-м.н. А.Л. Толстик принимал участие в интерпретации полученных экспериментальных данных, касающихся пространственного управления световыми пучками волноводными ЖК-структурами с электрически контролируемой модуляцией показателя преломления, а также в подготовке публикаций и обсуждении возможностей практического использования полученных результатов. Другие соавторы А.А. Комар, И.И. Рушнова (И.И. Оленская) проводили исследования особенностей управления

пространственно-поляризационными характеристиками световых пучков ЖК-элементами с рефрактивной границей, что не связано с представленными в диссертационной работе результатами.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты исследований, включенных в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях, семинарах и симпозиумах: XXI Международная научно-практическая конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Беларусь, Гродно, 2013); IX Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Беларусь, Минск, 2013); XIV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Россия, Москва, 2014); V Конгресс физиков Беларуси (Беларусь, Минск, 2015); 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (Италия, Тренто, 2016); XVII, XVIII International Conference – School «Foundations & Advances in Nonlinear Science» (Беларусь, Минск, 2014, 2016); International Conference Nanophotonics & Micro/Nano Optics 2017 (Spain, Barcelona, 2017).

Результаты выполнения темы «Разработка методов и технологии создания анизотропных жидкокристаллических фотонных структур и оптимизация их оптических и оптоэлектронных свойств для квантово-оптических приложений» ГПНИ «Конвергенция» (№ ГР 20115403) используются в лекционных курсах по дисциплинам «Оптика анизотропных сред», «Оптика полимеров и жидких кристаллов» на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ (Акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе №0304/242).

Разработанные при выполнении диссертационной работы волноводные электрически управляемые ЖК-элементы используются в специальном курсе «Волоконная и интегральная оптика» на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета (Акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе №0304/829).

Разработанная при выполнении диссертационной работы технология изготовления микроструктурированных жидкокристаллических элементов внедрена в производственный процесс научно-производственного республиканского унитарного предприятия «Актив БГУ» (Акт внедрения НИР в производственный процесс №0304/830).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, из которых 6 – статьи в научных журналах, соответствующих п.18 Положения о присуждении ученых степеней и

присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 2,4 авторских листа); 5 – статьи в сборниках материалов научных конференций; 3 – тезисы докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 118 страниц. Диссертация содержит 55 рисунков на 20 страницах, 1 таблицу на 1 странице, 1 приложение на 3 страницах. Библиографический список содержит 138 наименований, включая публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** критически проанализированы данные, представленные в научной литературе, посвященной оптическим устройствам на основе ЖК-волноводов.

В разделе **1.1** приведена краткая классификация оптических волноводов. В разделе **1.2** рассмотрены применения ЖК-волноводов в области разработки и создания оптических устройств управления световыми сигналами. В разделах **1.3** и **1.4** проанализированы особенности дизайна волноводных ЖК-компонент с перестраиваемыми оптическими параметрами, принцип функционирования которых основан на проявлении линейных и нелинейных оптических эффектов. На основе проанализированных научных работ, посвященных методам проектирования ЖК-волноводов и моделированию их оптических характеристик, показано, что выбор топологии ориентации директора ЖК на поверхности, а также технологии ее реализации оказывают существенное влияние на оптические параметры и функциональность оптических устройств.

Глава 2 посвящена методам проектирования и технологиям изготовления периодических волноводных НЖК-структур с электрически управляемой пространственной модуляцией показателя преломления.

В разделе **2.1** приведены результаты теоретического анализа топологий ориентации директора ЖК, обеспечивающих возможность возбуждения волноводного режима распространения линейно поляризованных световых пучков в тонкопленочных НЖК-слоях.

В разделе **2.2** разработана новая многодоменная планарная ортогональная топология ориентации директора в тонкопленочном НЖК-слое, обеспечивающая формирование периодической системы поляризационно-чувствительных волноводных каналов (рисунок 1 *a*). Для создания в пределах ЖК-слоя периодических областей (доменов) с разными ориентациями

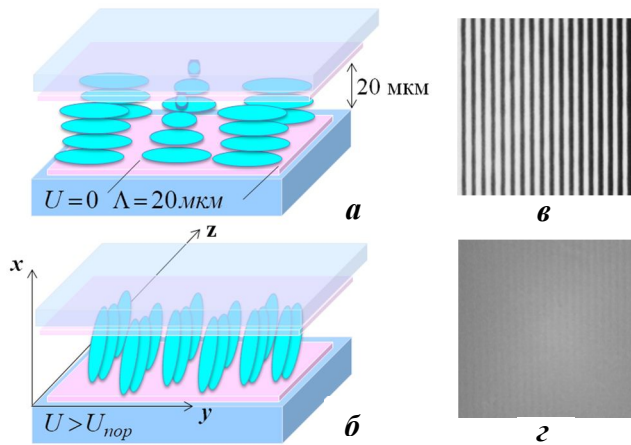


Рисунок 1. – НЖК-ячейка с многодоменной ориентацией директора: схема (а, б) и поляризационные микрофотографии (в, з)

пространственная модуляция топологии ориентации директора ЖК (период $\Lambda = 20 \text{ мкм}$), обеспечивающая формирование периодической системы поляризационно-чувствительных волноводных каналов (рисунок 1 а, в). Для

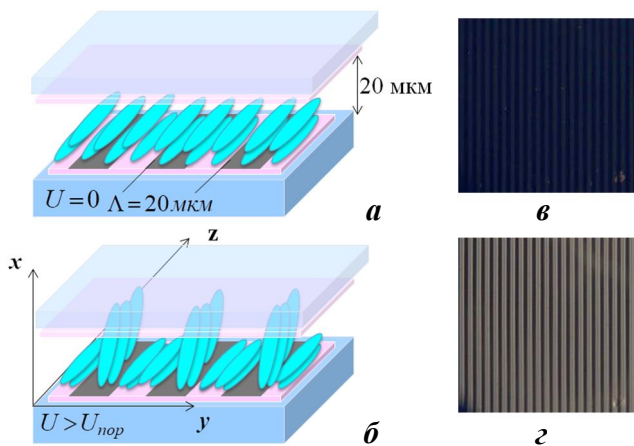


Рисунок 2. – НЖК-ячейка с текстурированным электродом: схема (а, б) и поляризационные микрофотографии (в, з)

($\nu = 1 \text{ кГц}$), превышающего пороговое значение ($U > U_{\text{пор}}$), (рисунок 1 б, з) происходит процесс переориентации директора вдоль линий напряженности электрического поля (переход Фредерикса). В результате многодоменная ориентация директора становится однородной гомеотропной в объеме НЖК-слоя, что приводит к исчезновению волноводных свойств ячейки.

В разделе 2.3 приведена технология проектирования периодических волноводных ЖК-структур, основанная на воздействии пространственно модулированного электрического поля на НЖК-слой с однородной планарной ориентацией директора. Для получения пространственной модуляции

директора использовалась технология фотоориентации НЖК. Реализация волноводных свойств в разработанной НЖК-структуре основана на эффекте полного внутреннего отражения (ПВО) линейно поляризованных световых пучков от рефрактивных границ раздела периодических ЖК-областей с разными ориентациями директора.

При отсутствии управляющего напряжения на ячейке ($U=0$), в пределах НЖК-слоя толщиной $d=20 \text{ мкм}$, наблюдается

светового пучка, линейно поляризованного вдоль оси y , данный микроструктурированный НЖК-слой представляет собой оптический волновод: показатель преломления ЖК-областей с директором (n), параллельным направлению электрического вектора E световой волны, соответствует $n_e = 1,67$; эффективный показатель преломления смежных ЖК-областей $n_{ef} < n_e$. При подключении к ЖК-ячейке низкочастотного напряжения

электрического поля был использован текстурированный токопроводящий слой хрома гребнеобразной формы (период $\Lambda=20$ мкм) на нижней подложке ЖК-ячейки. На рисунке 2 приведены принципиальная схема, а также соответствующие поляризационные микрофотографии ЖК-ячейки ($d=20$ мкм) с электрически индуцируемыми волноводными каналами. Под действием внешнего пространственно модулированного напряжения U , превышающего пороговое напряжение перехода Фредерикса ($U_{nop} = 1,0$ В), в ЖК-областях, расположенными над токопроводящими полосами хрома, происходит переориентация директора из планарного состояния в гомеотропное, что обуславливает увеличение эффективного показателя преломления в области сердцевины ЖК-волновода:

$$n_{ef}(\theta) = \frac{n_e \cdot n_o}{\sqrt{n_e^2 \cdot \cos^2 \theta + n_o^2 \cdot \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

где θ – угол поворота директора ЖК относительно оси z . В области промежутков между токопроводящими полосами ориентация директора ЖК остается исходной планарной (рисунок 2 б, з). Периодическое чередование ЖК-доменов с разной ориентацией директора (планарной/гомеотропной) проявляется в виде пространственной модуляции показателя преломления, обуславливающей формирование системы поляризационно-чувствительных волноводных каналов в НЖК-слое. Глубина модуляции показателя преломления в пределах данной периодической НЖК-структуры определяется величиной электрического напряжения, приложенного к ячейке. При отключении внешнего электрического поля имеет место восстановление исходной (однородной планарной) ориентации директора ЖК в соответствии с граничными условиями, заданными на подложках, что приводит к исчезновению волноводных свойств ячейки.

Глава 3 посвящена исследованию пространственного управления световыми пучками видимой области спектра волноводными НЖК-структурами с пространственной модуляцией топологии ориентации директора.

В разделе **3.1** описана методика проводимых экспериментальных исследований, приведены параметры высокоразрешающей экспериментальной установки для наблюдения и регистрации планарного распространения световых пучков в плоскости тонкопленочных ЖК-слоев. Анализ пространственного распределения световых полей в волноводных ЖК-структурах был выполнен на основе стандартного метода фиксации картины рассеяния лазерного излучения на неоднородностях ориентации директора ЖК. Для определения профиля распределения интенсивности светового поля в волноводном НЖК-слое использовался метод компьютерной обработки полученных экспериментальных фотографий.

Раздел 3.2 посвящен экспериментальной реализации волноводного режима распространения световых пучков в НЖК-структуре с многодоменной топологией ориентации директора. Линейно поляризованное излучение *He-Ne*-лазера (вектор E параллелен оси y) с длиной волны 633 нм и мощностью 0,2 мВт фокусировалось при помощи микрообъектива в пятно диаметром 16 мкм и направлялось в торец электроуправляемой ЖК-ячейки в область уединенного ЖК-волновода. В условиях отсутствия управляющего напряжения на ячейке $U=0$ (рисунок 3) экспериментально реализован режим волноводного распространения светового пучка в плоскости ЖК-слоя, основанный на эффекте ПВО излучения от рефрактивных границ раздела периодических ЖК-областей с разными ориентациями директора. Поскольку направляющий режим реализуется для световых пучков с поляризацией, соответствующей необыкновенной волне – НЖК-структура с многодоменной ориентацией директора может использоваться в качестве интегрально-оптического поляризатора. При подключении к электродам ЖК-ячейки напряжения, превышающего порог перехода Фредерикса ($U>1,0$ В), экспериментально продемонстрировано убывание мощности направляемой моды (рисунок 3), обусловленное увеличением потерь на локализацию светового поля вследствие переориентации директора ЖК из планарного состояния в гомеотропное (n параллелен оси x). Разрушение волноводной НЖК-структуры под действием управляющего напряжения обеспечивает функционирование ЖК-ячейки в режиме ослабителя линейно поляризованных световых пучков.

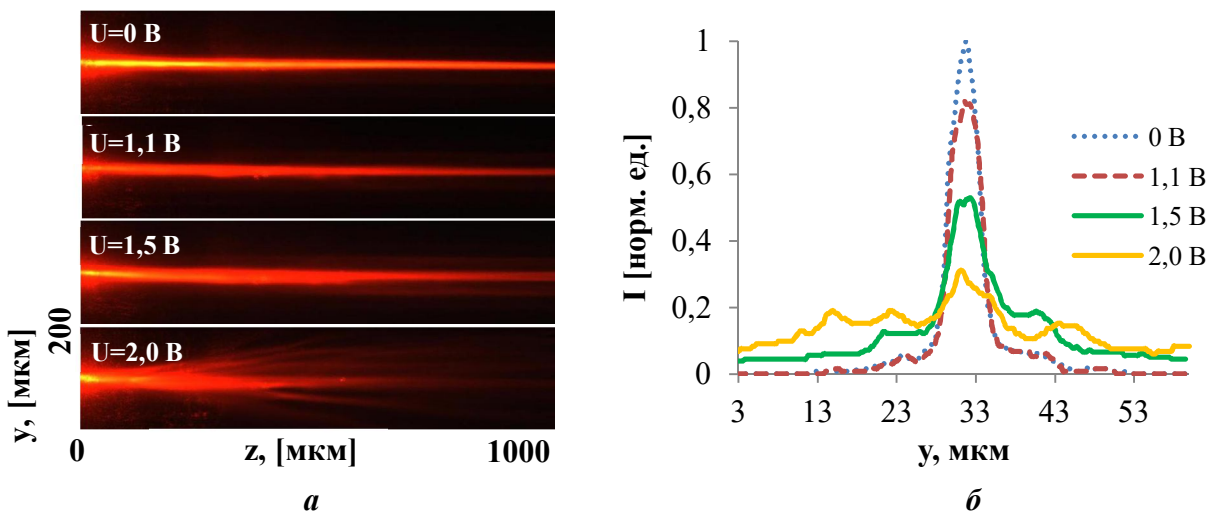


Рисунок 3. – Пространственное управление световым пучком волноводной НЖК-структурой с начальной многодоменной топологией ориентации директора: микрофотографии распространения светового пучка (а) и профили распределения интенсивности $I(y)$ светового поля для $z=1,0$ мм (б) при разных напряжениях U

Раздел 3.3 посвящен экспериментальным и теоретическим исследованиям параметров электрически индуцированных НЖК-волноводов, формируемых при воздействии на НЖК-слой внешнего пространственно модулированного

электрического поля, и условий возбуждения волноводного режима распространения световых пучков в микроструктурированных НЖК-элементах. На рисунке 4 показаны экспериментальные результаты распространения линейно поляризованного лазерного излучения (вектор E параллелен оси x) с длиной волны 633 нм и мощностью 0,2 мВт в НЖК-структуре с начальной планарной топологией ориентации директора при разных управляющих

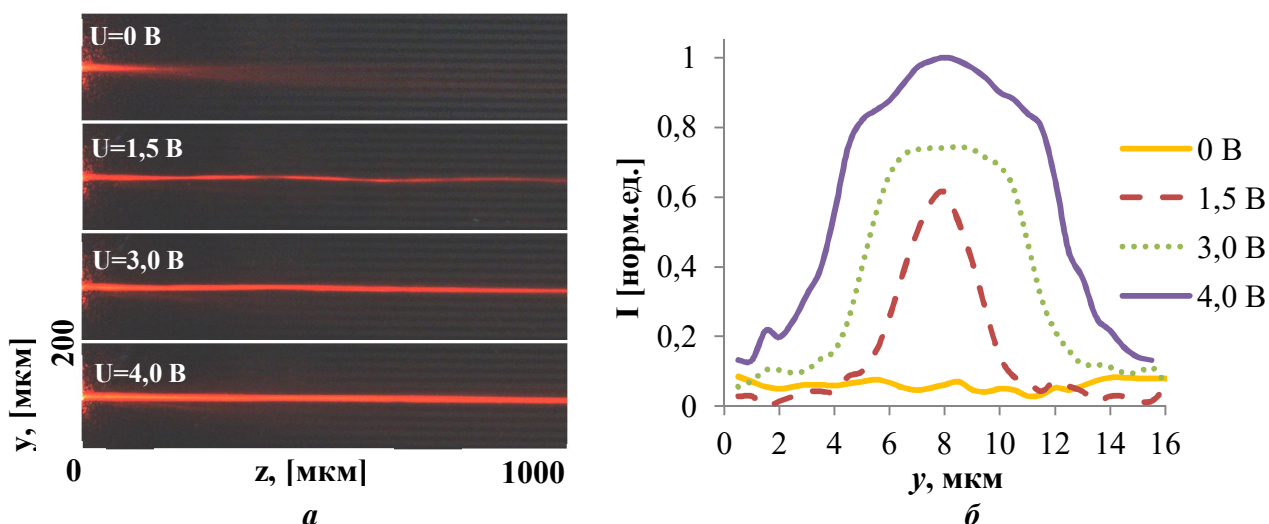


Рисунок 4. – Пространственное управление световым пучком электрически индуцированной волноводной НЖК-структурой: микрофотографии распространения светового пучка (а) и профили распределения интенсивности $I(y)$ светового поля для $z=1,0$ мм (б) при разных напряжениях U

напряжениях. При $U=0$ световой пучок претерпевает выраженное дифракционное расхождение в планарно-ориентированном НЖК-слое и ячейка работает в режиме ослабителя оптического сигнала. При увеличении пространственно модулированного напряжения до величины порога перехода Фредерикса ($U_{nop}=1,0$ В) в центре НЖК-слоя начинается процесс переориентации директора, приводящий к увеличению угла поворота θ директора относительно оси z . При напряжении $U=1,5$ В, которое незначительно превышает пороговую величину, наблюдается формирование электрически индуцированных волноводных каналов в НЖК-слое, обеспечивающих волноводный режим распространения светового пучка. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к росту эффективного показателя преломления ЖК в области сердцевины волноводных каналов, что обуславливает уменьшение потерь на локализацию светового поля. При напряжениях $U>1,5$ В наблюдается устойчивое распространение светового пучка в пределах электрически индуцированного поляризационно-чувствительного НЖК-волновода.

Методами компьютерного моделирования выполнены расчеты конфигурации электростатического поля, ориентации директора жидкого кристалла, изменения показателя преломления, а также проведены численные

расчеты поперечного распределения полей направляемых мод в разработанной волноводной НЖК-структуре с электрически индуцируемыми волноводными каналами. Расчеты проводились для электрически индуцированного НЖК-волновода на основе текстурированного электрода. Ширина уединенного электрода полагалась равной 10 мкм, ширина промежутков между электродами – 10 мкм, толщина НЖК-слоя составляла 20 мкм, что соответствовало условиям эксперимента. Характер зависимости распределения амплитуды светового пучка в плоскости (x,y) от величины управляющего напряжения на ЖК-ячейке, полученный в компьютерном эксперименте, (рисунок 5) хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными (рисунок 4): при увеличении напряжения на ячейке наблюдается устойчивая локализация светового поля в области электрически индуцированного НЖК-волновода.

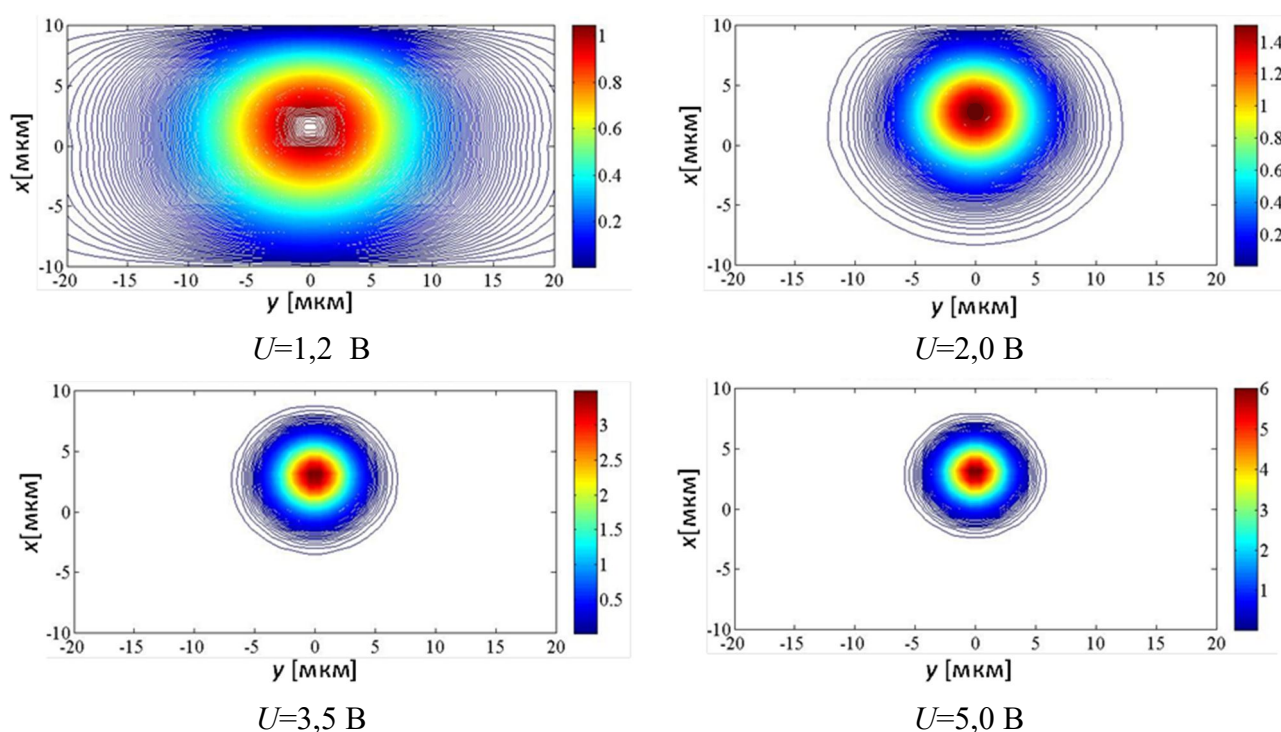


Рисунок 5. – Пространственные распределения амплитуды светового пучка в плоскости (x,y) НЖК-слоя при различных значениях управляющего напряжения U

В разделе 3.4 разработаны две новые конфигурации текстурированных токопроводящих покрытий на подложках ЖК-ячейки, обеспечивающие формирование электрически индуцированных поляризационно-чувствительных волноводных разветвителей и сумматоров в тонкопленочных планарно-ориентированных НЖК-слоях. Созданы макеты электрически управляемых волноводных НЖК-элементов для интегрально-оптических схем, позволяющие осуществлять передачу оптических сигналов по волноводным каналам и разветвителям, а также реализовать мультиплексирование в видимой области спектра.

При выключенном внешнем напряжении ($U=0$) волноводный НЖК-разветвитель функционирует в режиме ослабителя линейно поляризованного лазерного излучения (вектор E параллелен оси x) с длиной волны 532 нм (рисунок 6). При напряжениях ($U \geq 1,5$ В) в планарно-ориентированном НЖК-слое имеет место формирование электрически индуцированных волноводных каналов в соответствии с конфигурацией токопроводящего слоя, обеспечивающих реализацию волноводного распространения лазерного излучения. Разработанный электрически управляемый НЖК-разветвитель характеризуется низкими управляющими напряжениями и позволяет осуществить пространственное управление световыми пучками, в частности выполнить функции делителя оптической мощности.

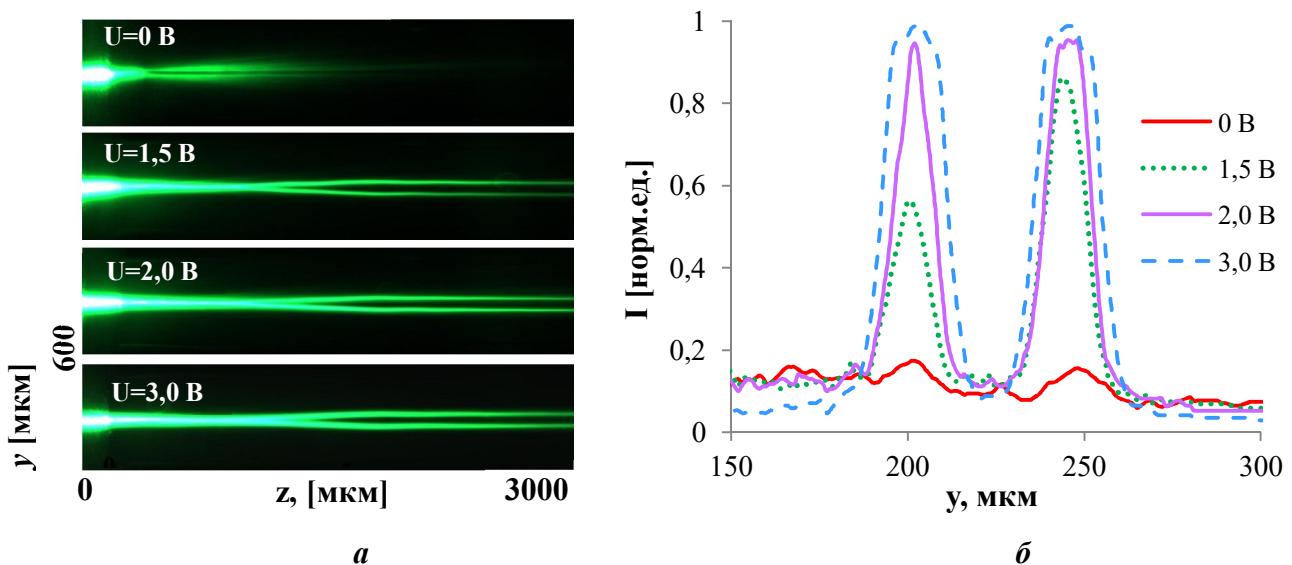


Рисунок 6. – Пространственное управление световым пучком волноводным НЖК-разветвителем: микрофотографии распространения светового пучка (а) и профили распределения интенсивности $I(y)$ светового поля для $z=2,0$ мм (б) при разных напряжениях U

В ячейке с электрически индуцированным волноводным НЖК-сумматором (рисунок 7) при одновременном распространении световых пучков с длинами волн $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 633$ нм имеет место пространственное разделение оптических мощностей в соответствии с конфигурацией текстурированного электрода, т.е. два крайних пучка на выходе несут информацию о входных сигналах, в то время как центральный пучок отвечает суммарному оптическому сигналу.

Разработанные макеты миниатюрных электрически управляемых НЖК-элементов для интегрально-оптических схем, характеризуются низким управляющими напряжениями (порядка единиц вольт) и позволяют осуществлять передачу оптических сигналов по каналным волноводам, разветвителям, сумматорам.

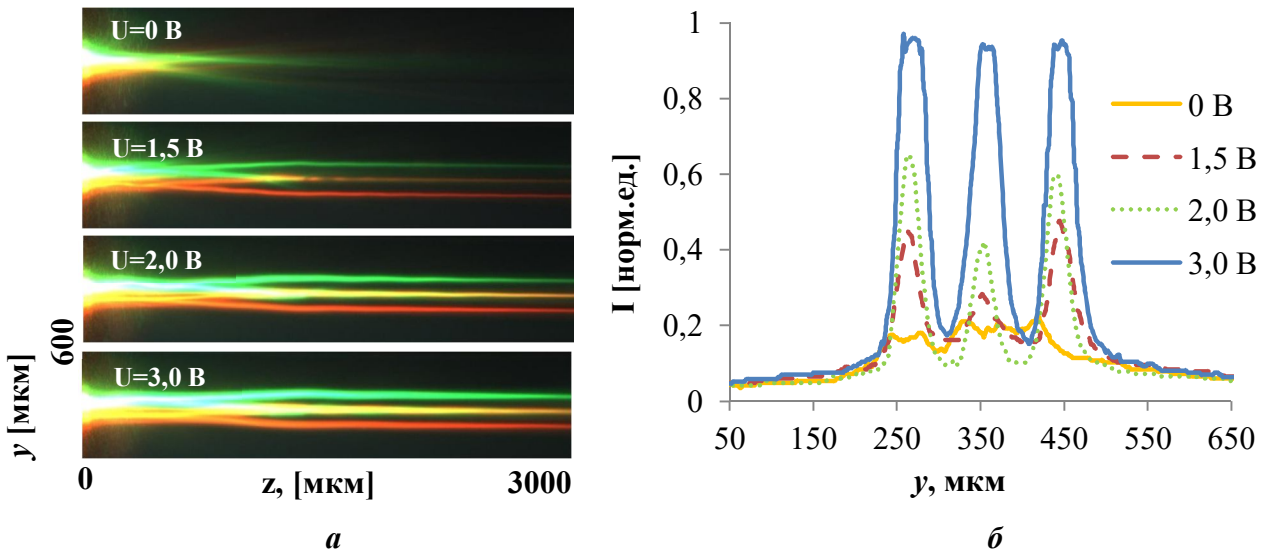


Рисунок 7. – Пространственное управление световыми пучками волноводным НЖК-сумматором: микрофотографии распространения световых пучков (а) и профили распределения интенсивности $I(y)$ световых полей для $z=2,0$ мм (б) при разных напряжениях U

Глава 4 посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию закономерностей распространения пространственных оптических солитонов в системе электрически управляемых НЖК-волноводов.

В разделе **4.1** экспериментально определены условия возбуждения устойчивых пространственных оптических солитонов (нематиконов) в планарном НЖК-слое ($d=100$ мкм) при распространении линейно поляризованного лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Пороговый уровень плотности мощности в перетяжке светового пучка, приводящий к формированию светоиндуцированного волноводного ЖК-канала, составил $P_{пор}=250$ Вт/см² при оптимальном значении внешнего управляющего напряжения $U=1,1$ В на электродах ЖК-ячейки.

В разделе **4.2** установлено, что при распространении пространственного оптического солитона (нематикона) в периодической системе ($\Lambda=40$ мкм) НЖК-волноводов в условиях совместного проявления электрооптического и нелинейно-оптического отклика ЖК-среды реализуется режим оптического ЖК-разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов (рисунок 8). Для анализа полученных экспериментальных данных проводилось теоретическое моделирование распространения лазерного излучения в периодической системе электрически индуцированных НЖК-волноводов. Установлено, что совместное влияние электрически индуцированной модуляции диэлектрической проницаемости, а также нелинейного ориентационного эффекта при распространении линейно поляризованного лазерного излучения в периодической системе НЖК-волноводов ($\Lambda=40$ мкм) обуславливает формирование сложной многомодовой структуры излучения, как показано на рисунке 9.

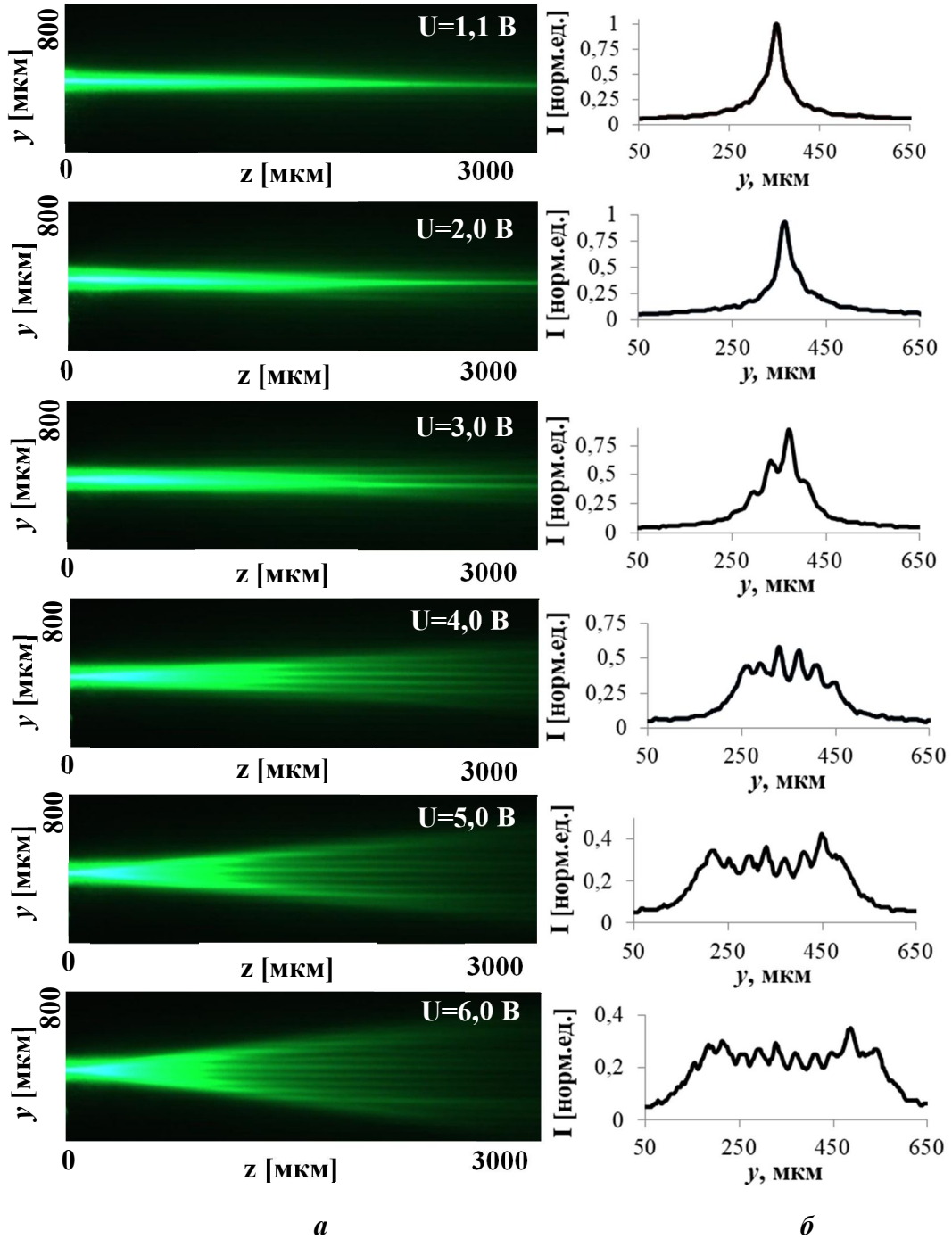


Рисунок 8. – Волноводный НЖК-разветвитель: распространение линейно поляризованного лазерного излучения в системе связанных оптических НЖК-волноводов при разных управляющих напряжениях U (а) и соответствующих зависимостях профиля распределения интенсивности $I(y)$ светового поля для длины распространения $z=2,0$ мм (б)

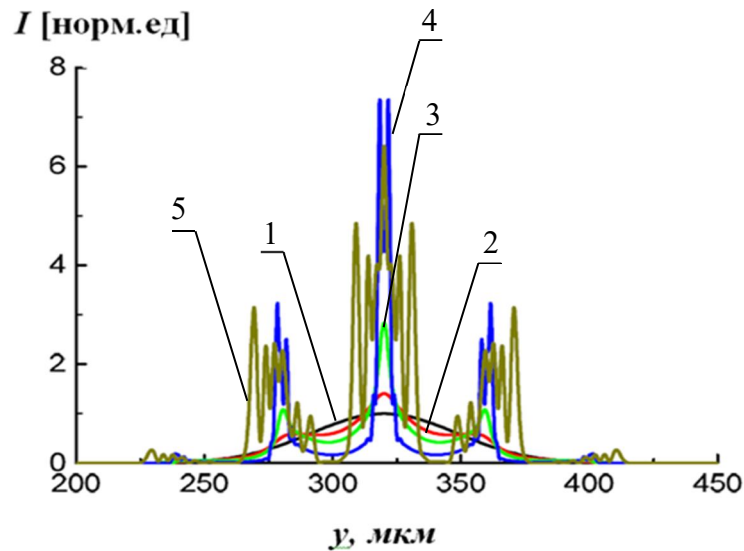


Рисунок 9. – Теоретически рассчитанные профили распределения интенсивности светового пучка $I(y)$ в системе электрически индуцированных НЖК-волноводов при напряжении $U=3,0$ В и длинах распространения z : 1 – 0; 2 – 50 мкм; 3 – 100 мкм; 4 – 150 мкм; 5 – 400 мкм

Разработанная периодическая система НЖК-волноводов позволяет реализовать функции оптического разветвителя с управляемым числом включаемых каналов для светового пучка с фиксированной интенсивностью путем варьирования управляющего напряжения в диапазоне от 0 до 6 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана новая многодоменная планарная топология ориентации директора в электрически управляемой ЖК ячейке, обеспечивающая контролируемый режим волноводного распространения линейно поляризованного лазерного излучения. [2, 9].

2. На основе предложенной топологии ориентации директора ЖК отработаны технологии проектирования и изготовлены волноводные НЖК-структуры с электрически управляемой пространственной модуляцией ориентации директора [2, 9, 11, 13].

3. Экспериментально реализован режим волноводного распространения линейно поляризованного лазерного излучения в НЖК-структурах с пространственной модуляцией топологии ориентации директора. Установлено, что электрооптический отклик НЖК-среды позволяет осуществить плавное управление волноводными параметрами разработанных НЖК-структур посредством изменения внешнего переменного электрического напряжения в диапазоне от 0 до 4 В [3, 4, 7, 8, 11].

4. Предложены две новые конфигурации пространственно модулированного электрического поля, обеспечивающие формирование в планарно-ориентированном НЖК-слое поляризационно-чувствительные волноводные разветвители и сумматоры. Созданы макеты электрически управляемых волноводных НЖК-элементов для интегрально-оптических схем, позволяющие осуществлять передачу оптических сигналов по волноводным каналам, разветвителям, сумматорам [1, 8, 10, 12].

5. Экспериментально определены условия возбуждения пространственных оптических солитонов (нематиконов) в планарно-ориентированном НЖК-слое толщиной 100 мкм. Показано, при распространении нематикона в системе связанных оптических НЖК-волноводов с электрически управляемой глубиной модуляции показателя преломления имеет место формирование сложной многомодовой структуры излучения. Разработанная периодическая система НЖК-волноводов позволила реализовать функции оптического разветвителя с управляемым количеством включаемых каналов для светового пучка с фиксированной интенсивностью путем варьирования управляющего напряжения в диапазоне от 0 до 6 В [5, 6, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Установленные новые закономерности распространения линейно поляризованных световых пучков в электрически управляемых волноводных НЖК-структурах с пространственной модуляцией ориентации директора могут быть использованы для создания конкурентоспособных, компактных, надежных, оптических устройств, осуществляющих пространственное управление световыми полями. Возможность функциональной перестройки разработанных тонкопленочных волноводных НЖК-элементов с электрически управляемой глубиной модуляции показателя преломления позволяет использовать их для решения прикладных задач интегральной оптики и нанофотоники.

Созданные в процессе выполнения диссертационной работы макеты волноводных НЖК-структур могут использоваться в новейших системах передачи оптической информации, а также при разработке оптических переключающих устройств и мультиплексоров.

Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс научно-производственного республиканского унитарного предприятия «Актив БГУ»; в учебный процесс на кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ; в учебный процесс на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета (получены 3 акта внедрения результатов).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

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

1. 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.

2. 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.

3. Мельникова, Е.А. Поляризационно-чувствительные волноводные каналы в нематическом жидком кристалле / Е.А. Мельникова, О.С. Кабанова // Вестн. БГУ. Сер.1.– 2016. – №2. – С. 48–51.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Кабанова, О.С. Полное внутреннее отражение и волноводное распространение света в пространственно структурированном нематическом жидком кристалле / О.С. Кабанова, А.А. Комар, И.И. Оленская // Физика конденсированного состояния: материалы XXI Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, Беларусь, 18–19 апреля 2013 г. / ГрГУ им. Я. Купалы; под ред.: В.Г. Барсукова [и др.]. – Гродно, 2013. – С. 75–77.

8. 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, Беларусь, 18–21 ноября 2013 г. / Белорус. гос. ун-т; под ред.: М.М. Кугейко [и др.]. – Минск, 2013. – С. 8–10.

9. 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, Москва, Россия, 26–31 мая 2014 г.: в 10 ч. [Электронный ресурс].– Москва, 2014. – Ч. 3. – С. 24 – 25. – Режим доступа: <http://waves.phys.msu.ru/files/docs/2014/thesis/Section3.pdf>. – Дата доступа: 10.02.2018.

10. Пространственно структурированные жидкокристаллические элементы для задач интегральной оптики / О.С. Кабанова, Е.А. Мельникова, А.Л. Толстик, И.И. Рушнова // V Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр. V Конгресса физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 27–30 октября, 2015 г. / Институт физики НАН Беларуси; редкол.: С.Я. Килин (гл.ред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2015. – С.215–216.

11. Methods of creation and optimization of anisotropic liquid–crystal photonic structures [Electronic resource] / I.A. Goncharenko, O.S. Kabanova, E.A. Melnikova, O.G. Romanov, I.I. Rushnova, A.L. Tolstik // Proc. of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks, Trento, Italy, July 10 – 14 2016. – Mode of access: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7550297/>.– Date of access: 17.01.2018.

Тезисы докладов конференций

12. Waveguide light propagation in electrically controlled liquid crystal elements / O.S. Kabanova, I.I. Olenskaya, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik. // Foundations & Advances in Nonlinear Science : XVII International conference–school, Minsk, September 29 – October 3 2014: book of abstracts / Publishing house of SPbSPU; edited by A.L. Tolstik, G.G. Krylov, D.W. Serov. – Saint Petersburg, 2014. – P. 65.

13. 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. // Foundations & Advances in Nonlinear Science: XVIII International conference–school, Minsk, September 27 – October 1 2016: book of abstracts / Publishing house of SPbSPU; edited by A.L. Tolstik, G.G. Krylov, D.W. Serov.– Saint Petersburg, 2016. – P. 48.

14. Kabanava, V.S. Propagation of light beams in microstructured nematic liquid crystals / V.S. Kabanava, E.A. Melnikova, A.L. Tolstik // Nanophotonics & Micro/Nano Optics: International Conference, Barcelona, Spain, 13–15 September 2017: book of abstracts / Prem C.; ed.: N. Tansu. – Barcelona, 2017. – P. 24.

Кабанова Ольга Сергеевна

Распространение световых пучков в волноводных электрически управляемых нематических жидкокристаллических структурах

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, оптическая анизотропия, волноводное распространение света, модуляция показателя преломления, нематикон, переход Фредерикса.

Цель работы: установить закономерности распространения световых пучков в тонкопленочных волноводных нематических ЖК-структурах с электрически управляемой пространственной модуляцией топологии ориентации директора.

Методы исследования: поляризационная оптическая микроскопия, экспериментальные методы исследования распространения световых пучков в оптически анизотропных средах, методы геометрической оптики, метод сравнения.

Использованная аппаратура: источники лазерного излучения, поляризационный микроскоп, спектрометр, генератор импульсов напряжения, микрообъективы, CCD-камеры, персональные компьютеры.

Полученные результаты и их новизна. Разработана новая топология начальной ориентации директора жидкого кристалла, обеспечивающая реализацию контролируемого режима волноводного распространения световых пучков в тонкопленочном нематическом ЖК-слое. Экспериментально реализовано пространственное управление световыми пучками на основе разработанных волноводных НЖК-структур, обеспечивающих функции оптического разветвителя и сумматора в условиях воздействия на планарно-ориентированный НЖК-слой внешнего пространственно модулированного электрического поля. Установлены новые закономерности пространственного распространения оптических солитонов в системе электрически индуцированных НЖК-волноводов, что позволило реализовать режим оптического ЖК-разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых волноводных каналов.

Рекомендации по использованию и область применения. Полученные результаты могут найти широкое применение при разработке и создании конкурентоспособных, надежных, миниатюрных фотонных устройств с перестраиваемыми оптическими параметрами, осуществляющих управление пространственно-поляризационными характеристиками световых полей. Возможность функциональной перестройки разработанных волноводных ЖК-элементов позволяет использовать их для решения прикладных и исследовательских задач волноводной фотоники.

Кабанав Вольга Сяргееўна

Распаўсюджванне светлавых пучкоў у хваляводных электрычна кіраваных нематычных вадкакрышталічных структурах

Ключавыя словы: нематычны вадкі крышталі, аптычная анізатрапія, хваляводнае распаўсюджванне святла, мадуляцыя паказчыка пераламлення, нематыкон, пераход Фрэдэрыкса.

Мэта работы: усталяваць заканамернасці распаўсюджвання светлавых пучкоў у тонкаплёнкавых хваляводных нематычных ВК-структурах з электрычна кіраванай прасторавай мадуляцыяй тапалогіі арыентацыі дырэктара.

Метады даследвання: палярызацыйная аптычная мікраскапія, эксперыментальныя метады даследвання распаўсюджвання светлавых хваляў у аптычна анізатропных асяроддзях, метады геаметрычнай оптыкі, метады параўнання.

Скарыстаная апаратура: крыніцы лазернага выпраменьвання; палярызацыйны мікраскоп; спектрометр; генератар імпульсаў напружання; мікрааб'ектывы; CCD-камеры; персанальныя камп'ютары.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана новая тапалогія пачатковай арыентацыі дырэктара вадкага крышталі, якая забяспечвае рэалізацыю кантраляванага рэжыму хваляводнага распаўсюджвання светлавых пучкоў у тонкаплёнкавым нематычным ВК-слоі. Эксперыментальна рэалізавана прасторавае кіраванне светлавымі пучкамі на аснове распрацаваных хваляводных НВК-структур, якія забяспечваюць функцыі аптычнага разгалінавальніка і суматара ва ўмовах уздзеяння на планарна-арыентаваны НВК-слой знешняга прасторава мадуляванага электрычнага поля. Устаноўлены новыя заканамернасці прасторавага распаўсюджвання аптычных салітонаў у сістэме электрычна індукаваных НВК-хваляводаў, што дазволіла рэалізаваць рэжым аптычнага ВК-разгалінавальніка з электрычна кіраванай колькасцю ўключаных хваляводных каналаў.

Сфера прымянення і рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя вынікі могуць знайсці шырокае выкарыстанне пры распрацоўцы і стварэнні канкурэнтна здольных, надзейных, мініятурных фатонных прылад з наладжвальнымі аптычнымі параметрамі, якія ажыццяўляюць кіраванне прасторава-палярызацыйнымі характарыстыкамі светлавых палёў. Магчымасць функцыянальнай перабудовы распрацаваных хваляводных ВК-элементаў дазваляе выкарыстоўваць іх для вырашэння прыкладных і даследчых задач хваляводнай фатонікі.

SUMMARY

Kabanova Olga Sergeevna

Propagation of light beams in waveguide electrically controlled nematic liquid crystal structures

Key words: nematic liquid crystal, optical anisotropy, waveguide propagation of light, modulation of the refractive index, nematicon, Fredericks transition.

The purpose of research: to establish the patterns of propagation of light beams in thin-film waveguide nematic LC structures with electrically controlled spatial modulation of director orientation.

Methods of study: polarization optical microscopy; experimental methods to study the light beam propagation in optically anisotropic media; geometrical optics methods; comparative method.

Used equipment: laser radiation sources, polarization microscope, spectrometer, voltage pulse generator, microlenses, CCD-cameras, personal computers.

Obtained results and their novelty. A new topology of the initial director orientation in a nematic liquid crystal is proposed, making it possible to realize the waveguide mode propagation of light beams in a thin LC-layer. Experimental implemented spatial control of light beams on the basis of the developed waveguide NLC-structures providing functions of the optical splitter and adder under influence of external spatially modulated electric field on planar LC-layer. Established new laws of spatial distribution of optical solitons in the system of electrically induced NLC-waveguides that allow to realize the function of an LC-splitter with the electrically controlled numbers of optically switched channels.

Recommendations for usage and field of applications. The obtained results can be widely used for the development and manufacturing of competitive, reliable, compact photonic devices with tunable optical parameters realizing the control over the spatial polarization characteristics of light beams. Due to the possibility of their functional reconstruction, the developed waveguide LC-elements may be used to solve the applied and scientific research problems associated with waveguide photonics.