



Бекшин Михаил Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ
ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРО- И НАНОФОТОНИКИ**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Краснодар – 2019

Работа выполнена в ФБГОУ ВО «Кубанский государственный университет»
на кафедре оптоэлектроники физико-технического факультета

- Научный консультант: Яковенко Николай Андреевич
доктор технических наук, профессор,
заслуженный изобретатель РФ,
действительный член АИИ РФ
имени А.М. Прохорова
- Официальные оппоненты: Шандаров Станислав Михайлович,
доктор физико-математических наук, про-
фессор, Федеральное государственное бюд-
жетное образовательное учреждение высше-
го образования «Томский государственный
университет управления и радиоэлектрони-
ки», заведующий кафедрой электронных
приборов
- Сотский Александр Борисович,
доктор физико-математических наук, про-
фессор, Могилевский государственный уни-
верситет имени А. А. Кулешова (Республика
Беларусь), профессор кафедры общей физики
- Вербенко Илья Александрович, доктор фи-
зико-математических наук, Южный феде-
ральный университет (г. Ростов-на-Дону),
директор научно-исследовательского инсти-
тута физики.
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образо-
вания «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени
М.И. Платова»

Защита состоится 18 октября 2019 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.101.07 Кубанского государственного университета по адресу:
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФБГОУ ВО
«Кубанский государственный университет», www.kubsu.ru.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.101.07, д.ф.-м.н.

Зарецкая Марина Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Актуальность исследований в области современной оптоэлектроники обусловлена требованиями разрабатываемых средств оптической и микроволновой связи новых поколений, а также созданием новых систем оптической обработки и передачи информации. Фундаментальные исследования в этой области направлены как на разработку новых принципов построения и технологий активных приемопередающих узлов [1-2], так и в области построения пассивной компонентной базы для оптоэлектронных систем различного функционального назначения.

Волновые свойства оптического излучения в различных средах являются предметом разноплановых научных исследований, а поиск и исследования новых физических эффектов, в том числе поляризационных эффектов, потенциально может привести к созданию принципиально новых методик обработки информации на оптическом уровне. Создание интегрально-оптических схем – аналогов электронных микросхем, в которых передача информации и функции ее обработки осуществляются на оптическом уровне, имеет большие перспективы развития, обусловленные свойствами световой волны. Элементы интегральной оптики используются в современных средствах оптической связи. На их основе возможно создание высокочувствительных сенсоров различных физических величин и химико-биологических компонентов и процессов.

Любая интегрально-оптическая схема основана на применении некоторого набора элементарных оптических элементов для передачи и разделения оптических сигналов, в том числе для реализации: межсоединения, деления мощности 1×2 и 2×2 и т.п., выделения определенной поляризации излучения и ее преобразования, пространственного разделения поляризаций, расширения оптического пучка, спектральной фильтрации. Посредством технологий интегральной оптики, а в последние годы и технологий плазмонной нанооптики, данные элементы реализуются посредством определенных волноводных конфигураций, в том числе S-изгибов, Y-разветвителей, направленных ответвителей, интерферометрических схем, схем с применением эффекта межмодовой интерференции и т.д. Любая из известных технологий интегральной оптики, которую планируется довести до стадии практического использования [3–12], должна включать в себя методики создания указанных элементов с оптимальными волноводными топологиями и оптико-физическими характеристиками, а также научно-обоснованные физико-математические модели их технологического формирования и функционирования.

Среди указанных интегрально-оптических элементов особое место занимают волноводные поляризаторы, пространственные разделители и преобразователи поляризаций оптического излучения. Причина повышенного интереса к созданию поляризационных элементов основана на важной задаче построения интегрально-оптических схем для поляризационно-разнесенной обработки данных в оптических информационных системах, и для их применения в новых системах связи с поляризационным уплотнением каналов, так как, во-первых, подавляющее большинство таких схем обладают поляризационно-зависимыми свойствами, а, во-вторых, стандартные оптические волоконные световоды, применяемые в системах оптической связи, не сохраняют неизменным направление поляризации распространяющегося излучения. Поляризационные элементы используются также в оптических изоляторах и различных волоконно-оптических сенсорах, области применения которых постоянно расширяются. Известные подходы к построению

поляризационных волноводных схем приводят к созданию последних с целым рядом недостатков – малым рабочим спектральным диапазоном, очень жесткими допусками на технологические параметры, плохой совместимостью с волоконными световодами, необходимостью использования дорогостоящего технологического оборудования и целым рядом других.

Указанные недостатки обусловлены проблемными вопросами и принципиальными ограничениями существующих базовых подходов к построению волноводных поляризационных элементов, особенно это касается методик построения преобразователей плоскости поляризации, требующих применения интерференционных эффектов с присущими им недостатками, асимметрию волновода и т.д.. Настоящее исследование направлено на решение проблемы создания новых физических подходов и физико-технологических принципов построения поляризационных схем интегральной оптики на базе перспективных технологий формирования интегрально-оптических элементов. Соответственно, в прикладном аспекте выбранное направление исследований направлено на создание новых оптических элементов и прототипов устройств с улучшенными характеристиками.

Методы формирования элементов интегральной оптики и микрооптики в подложках из стекла путем ионного обмена обладают широкими возможностями для создания различных оптических элементов и волноводных структур [5-12]. Гибкими возможностями обладают способы формирования оптических элементов на основе методов термического ионного обмена и электростимулированной миграции ионов серебра, калия, таллия, меди [7] и ряда других ионов металлов. Несмотря на то, что основы формирования волноводов данными методами известны достаточно давно, работы в этой области в России и за рубежом были посвящены преимущественно исследованиям различных методов создания градиентных волноводов с различными диффузантами, созданию отдельных элементов микрооптики и материалов для них [8-9], в том числе фазовых дифракционных решеток, с прогнозируемыми характеристиками в стеклах различного состава, построению соответствующих физико-математических моделей, описывающих эти технологические процессы, а также (в последнее время) исследованиям эффекта локализованного плазмонного резонанса в ионообменных приповерхностных слоях стеклянных подложек [10]. Представлялось актуальным внести вклад в продолжение и дополнение этих исследований и провести систематизированное комплексное трехмерное физико-математическое моделирование процессов формирования базового набора волоконно-совместимых оптических элементов в стеклах (в том числе направленных ответвителей и интерферометров, двухслойных волноводных схем и схем с частичным заглублением канала) для передачи и разделения сигналов, на основе одномодовых волноводных структур в подложках из силикатного стекла. Результаты численного моделирования должны быть ориентированы на практическое изготовление волноводных схем с заданными оптико-физическими параметрами, что имело бы фундаментальную и практическую ценность.

Так же это позволило бы осуществлять разработку, изготовление и исследование более сложных интегрально-оптических схем для функциональной обработки оптических сигналов с длинами волн в диапазоне 0,6-1,6 мкм, востребованных в различных направлениях прикладной фотоники и оптоэлектроники. Актуальность исследований по этому направлению обусловлена перспективами использования интегрально-оптических схем на основе таких волноводов для систем волоконно-оптической связи, для создания оптических межсоединений в микроэлектронных схемах, и в области создания 3D волноводных схем различного

функционального назначения, в том числе для схем квантовой фотоники и криптографии [13] и т.п.

Целью работы является проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследования поляризационных эффектов в оптических волноводных структурах, включая закономерности гибридизации волноводных мод в слабонаправляющих многослойных диэлектрических волноводах, развитие трехмерной физико-математической модели формирования элементов интегральной оптики в стекле сложных конфигураций методами многоэтапного ионного обмена, в целом направленных на разработку принципов и физико-технологических основ построения компонентной базы пассивных интегрально-оптических схем для систем оптической обработки информации и сенсорных устройств.

Основные задачи диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Исследования поляризационных и дисперсионных характеристик многослойных интегрально-оптических диэлектрических волноводов на основе изотропных слоев, в том числе установление новых закономерностей существенной гибридизации мод и проявления высокого модового двулучепреломления;

2. Разработка новых принципов пространственного разделения и преобразования поляризационных компонент направленного оптического излучения, его поляризационной и спектральной фильтрации и разработка оптимальной топологии интегрально-оптических схем, реализующих указанные функции, включая построение физико-математической модели их функционирования;

3. Построение научно-обоснованной общей трехмерной физико-математической модели многоэтапного формирования пассивных одномодовых элементов интегральной оптики и микрооптики сложных топологий методом электростимулированной миграции ионов Ag^+ , K^+ и др. и термического ионного обмена в подложках из силикатного стекла и ее применение для создания компонентной базы волноводных схем для систем оптической связи и сенсорных устройств;

4. Исследование процессов и особенностей распространения и интерференции направленных волн, а также взаимодействия направленных и излучательных волн в интегрально-оптических одномодовых структурах сложной разветвленной топологии, в том числе с применением оптических элементов направленной связи, в спектральном диапазоне 1,3–1,6 мкм для построения и моделирования интегрально-оптических схем для распределения излучения и их спектральной обработки для волоконно-оптических средств связи;

5. Разработка и формирования оптических схем для сенсорных устройств с применением элементов микрооптики в стекле и плазмонной нанооптики;

6. Исследования свойств поверхностных плазмон-поляритонов для создания элементов нановолноводных интегрально-оптических схем;

7. Создание универсального программного обеспечения для автоматизированной оптимизации и формирования топологий интегрально-оптических схем и схем на поверхностных плазмонах.

Для достижения поставленных в работе задач применялись следующие экспериментальные и теоретические подходы:

1. Методы расчета поляризационных и дисперсионных характеристик оптических волноводных микро- и наноструктур путем полного векторного модового анализа и анализа эволюции распространяющегося пучка.

2. Методы численного решения многомерных нелинейных уравнений параболического типа, описывающих электростимулированную диффузию ионов и

ионный обмен, методы расчета и анализа параметров направленных волн в интегрально-оптических схемах – конечно-разностный метод распространяющегося пучка, в декартовых и локальных цилиндрических координатах, с граничными условиями идеально согласованного слоя, полный векторный конечно-элементный модовый анализ. Линейно-алгебраические задачи большой размерности, возникающие в ходе применения указанных методов, решались с применением метода неполной блочной факторизации.

3 Симплекс-метод многомерной оптимизации Нелдера-Милла с ограничениями на диапазон поиска для реконструкции параметров оптических волноводов.

4. Строгий метод связанных волн и прямое конечно-разностное решение уравнений Максвелла в пространственно-временном масштабе использовались для расчета различных схем на поверхностных плазмонах.

5. Изготовление макетов оптических волноводных схем проводилось методами многоэтапного электростимулированной миграции ионов и ионного обмена; экспериментальные методы исследования волноводных структур, элементов микрооптики и схем с применением поверхностных плазмонов проводились путем фотометрии на основе торцевой схемы ввода излучения, с помощью призмных угловых измерений, с применением метода ближнего поля, электронной растровой микроскопии и т.д.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложены и обоснованы новый метод разделения поляризационных компонент анализируемого оптического излучения в пространстве и новый метод поляризационной селекции излучения, реализуемые посредством интегрально-оптическим структур на основе многослойных канальных волноводов из изотропных диэлектрических слоев с высоким модовым двулучепреломлением, построены физико-математические модели их функционирования. На основе специальных конфигураций волноводов предложен и обоснован новый способ построения полосно-заграждающего оптического спектрального фильтра, а также модифицирована схема разностного интерферометра для оптических биосенсоров.

2. На основе установленных закономерностей формирования гибридных мод в слабонаправляющем четырехслойном оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев предложен и обоснован новый метод преобразования плоскости поляризации, использующий либо эволюцию моды, либо биения мод. Построена физико-математическая модель поворота плоскости поляризации в преобразователе поляризаций, экспериментально верифицированная.

3. Предложен и обоснован новый способ пассивного преобразования линейной плоскости поляризации оптического излучения в круговую с применением асимметричного частично заглубленного ионообменного волновода в стеклянной подложке, основанный на принципе модовой эволюции. Определены поляризационные характеристики асимметричного ионообменного селективно заглубленного волновода с различными диэлектрическими покровными слоями и построена модель оптического преобразователя поляризаций на его основе. Расчетные значения угла поворота поляризации составляют: $-42,4^\circ$ и $47,6^\circ$ при входном ТЕ- и ТМ-поляризованном излучении, соответственно. Построена физико-математическая модель оптического преобразователя поляризаций.

4. Проведено физико-математическое моделирование технологического цикла формирования компонентной базы одномодовых интегрально-оптических схем в силикатных стеклах методами многоэтапного бинарного ионного обмена и

электростимулированной миграции ионов Ag^+ , K^+ и т.п. на основе совместных решений нелинейных уравнений диффузии и уравнения электростатики в двумерном пространстве для расчета концентрационного профиля оптических микроструктур, в том числе структур с частичным заглублением и двухслойных волноводов, формируемых при различном отношении подвижностей обменивающихся ионов, вплоть до их большого различия. Данная модель, совместно с трехмерным векторным методом распространяющегося пучка и рядом других методов анализа оптических схем, применена для разработки и формирования пассивных волноводных структур, включая элементы направленной связи и интерферометры, а также матриц микролинз, с прогнозируемыми оптическими и технологическими характеристиками, которые реализуют базовый набор функций передачи и разделения оптических сигналов, в том числе на длине волны 1,55 мкм, для телекоммуникационных и сенсорных устройств.

5. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований оптических свойств поверхностных плазмонов в микрополосковых и щелевых волноводных схемах и дифракционных наноструктурах, направленных на разработку и моделирование новой интегрально-оптической схемы для пространственного разделения поляризаций на основе комбинированной металлодиэлектрической волноводной структуры Y-разветвителя в стекле, прототипа оптического плазмонно-резонансного биосенсора с применением металлодиэлектрической дифракционной решетки трапециевидной формы, а также с целью оценки потерь оптической энергии ТМ-волн в нановолноводных схемах на основе щелевых волноводов.

6. Методом электростимулированной миграции ионов изготовлены и исследованы дальноточные матрицы микролинз (фокусное расстояние 2–4,5 мм) с высоким коэффициентом заполнения, использованные в сенсорах волнового фронта Шака-Гартмана.

7. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик распространения и интерференции направленного оптического излучения в разветвленных пассивных волноводных структурах в стеклянных подложках с учетом эффекта когерентной связи направленных и излучательных мод, приводящему к неравномерному делению мощности в разветвителях и ограничениям на размеры интегральных схем, на основе анализа дисперсионной характеристики сделаны выводы по организации широкополосного одномодового режима с приемлемыми потерями оптической энергии для разветвителей оптических сигналов $1 \times N$ древовидной топологии и на основе эффекта межмодовой интерференции в квазипланарных волноводах, $2 \times N$ – с применением асимметричных направленных ответвителей. Выполнен расчет оптимальных характеристик оптической схемы волнового мультиплексора 1×4 с расстоянием между каналами 20 нм на основе каскадов неравноплечного интерферометров Маха-Цендера в стекле, определены допуски на технологические параметры формируемых схем.

8. Создан комплекс программных средств для полного векторного расчета и анализа поляризационных элементов интегральной оптики и микрооптики в стекле, а также волноводной плазмонной нанооптики.

Связь с государственными программами и НИР.

Представленные в работе результаты получены автором в ходе работ по ряду программ государственных фундаментальных НИР в ФБГОУ ВО «Кубанский государственный университет», выполненных в 1998-2017 гг. по темам:

- “Технические и экспериментальные исследования новых физических принципов построения интегрально-оптических поляризационных элементов и перспективных высокоэффективных лазерных сред”, № ГР 01200004011;
 - “Исследование и разработка устройств управления оптическим излучением на основе многослойных оптических структур и запредельных линий передачи”, № ГР 01200119377;
 - “Разработка физико-технологических основ построения многоканальных микроволноводных оптоэлектронных биосенсоров”, № ГР 01200215210;
 - “Исследование и разработка новых физико-технологических принципов построения оптоэлектронных, микро- и нанооптических устройств сбора, обработки и передачи информации и перспективных сред для микролазеров”, № ГР 01200313972;
 - “Исследование новых физико-технологических принципов построения элементов квантовой и наноразмерной фотоники”, № ГР 01200503899;
 - “Разработка и исследование новых физико-технологических принципов построения функциональных элементов и микросистем нанофотоники”, № ГР 01200804229;
 - “Исследование и моделирование физико-технологических процессов формирования и принципов построения микрооптических элементов и многоканальных структур плазмонной нанофотоники”, № ГР 01201259839;
- а также в рамках следующих государственных программ:
- по проектам РФФИ: 06-02-96640 р_ю_а “Исследование плазмонно-резонансных эффектов и электронных свойств квантовых структур в наноразмерной фотонике (2008-2009 гг.), 16-48-230392 р_а “Новые методы физико-математического моделирования многоэтапных процессов формирования оптических микро- и наноструктур в стеклах” (2016-2017 гг.);
 - НИР по контракту с государственным фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (г. Москва) “Исследование и разработка режимов изготовления интегрально-оптических элементов” в 2007-2008 гг., № ГР 0120.0604106;
 - по программе стратегического развития Кубанского государственного университета “Создание компонентной базы современной фотоники” (2012-2016 гг.), № ГР 01201351709.

Практическая ценность работы заключается в создании методов построения различных волноводных поляризационных элементов, построении научно-обоснованной технологии формирования компонентов интегральной оптики методом многоэтапного электростимулированного ионного обмена и возможности применения разработанных методик, результатов расчетов и экспериментов для создания одномодовых пассивных интегрально-оптических схем в стекле и других элементов микрооптики различного функционального назначения.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Международных научно-технических конференциях "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники", Таганрог, 1994-2010 (ежегодно)-,
2. IEEE Singapore International Conference on Networks / International Conference on Information Engineering, Singapore, 1995
3. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics "ICONO-2005", St. Petersburg, 2005,
4. 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments, Saint-Petersburg, 2009,
5. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO)/ International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT), 2010, Kazan, Russia,
6. Международной конференции "Прикладная оптика-2004", Санкт-Петербург,
7. Международной конференции "Нанотехнологии – производству-2005", Москва, 2005,
8. VI Международной конференции "Оптические технологии в телекоммуникациях", Казань, 2008,
9. XII, XIII, XIV Международных конференциях "Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы", Ульяновск, 2010-2012,
10. XVII, XXI-XXIV Международных конференциях "Оптика и спектроскопия конденсированных сред", Краснодар, 2011. 2015-2018 (ежегодно),
11. Международных научно-технических конференциях-семинарах по фотонике и информационной оптике, Москва, МИФИ, 2011–2018 (ежегодно) и ряде других.

Публикации и вклад автора

По теме диссертации опубликовано 130 работ, в том числе 34 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, в том числе 33 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) России для соискателей ученой степени доктора наук, 9 статей в журналах, входящих в базу данных Scopus и 6 статей, входящих в базу данных Web of Science (Core Collection). Получено 8 патентов РФ и 4 государственных свидетельства на программный продукт. Опубликована монография по теме работы. Основные результаты диссертации отражены в 34 публикациях, список которых вместе со списком патентов и списком свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ приводится в конце автореферата.

Автору принадлежит постановка задач исследования, обоснование способов их теоретического и экспериментального осуществления. Автор самостоятельно выполнил все теоретические и расчетные задачи исследования и ту часть экспериментальных исследований интегрально-оптических схем и оптических схем на поверхностных плазмонах, которая посвящена измерениям их параметров и характеристик. Данные исследования были проведены в лаборатории волноводной оптоэлектроники и нанофотоники кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета. Часть работы, посвященная формированию интегрально-оптических схем, была выполнена в лаборатории технологий оптоэлектроники и фотоники при непосредственном участии автора.

На всех этапах работы результаты обсуждались с научным консультантом, профессором, действительным членом Академии инженерных наук РФ имени А.М. Прохорова Н.А. Яковенко

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения (332 страниц текста, 185 рисунков, 12 таблиц). Список литературы содержит 268 наименований.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Новый оптико-физический метод адиабатического разделения ортогональных поляризационных компонент направленного излучения в пространстве и новый метод поляризационной фильтрации излучения. Методы реализованы на основе интегрально-оптических схем в подложках из стекла с применением диэлектрических изотропных волноводов с высоким модовым двулучепреломлением и позволяют получить коэффициент развязки между ТЕ- и ТМ-поляризациями оптического излучения до 25 дБ. Физико-математические модели функционирования разделителей поляризации и поляризаторов, экспериментально подтвержденные (для поляризаторов).

2. Новый метод пассивного преобразования плоскости поляризации в слабо-направляющем четырехслойном оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев, основанный на эффекте гибридизации мод и конверсии моды TM_0 в моду TE_1 с эффективностью преобразования 95%. Закономерности формирования гибридных мод оптического волновода, являющиеся основой этого метода. Экспериментально подтвержденная физико-математическая модель функционирования нового волноводного преобразователя поляризаций оптического излучения.

3. Новый способ пассивного преобразования линейной плоскости поляризации излучения в круговую с применением асимметричного частично заглубленного ионообменного волновода в стекле, основанный на принципе модовой эволюции. Поляризационные характеристики асимметричного ионообменного селективно заглубленного волновода и модель преобразователя поляризаций на его основе. Расчетные значения угла поворота поляризации составляют $-42,4^\circ$ и $47,6^\circ$ при входном ТЕ- и ТМ-поляризованном излучении, соответственно. Физико-математическая модель преобразователя поляризаций.

4. Новая оптическая схема полосно-заграждающего фильтра на основе четырехслойного оптического диэлектрического волновода и физико-математическая модель ее функционирования, основанная на особенностях дисперсионной характеристики такого волновода. Коэффициент пропускания фильтра на длине волны 0,98 мкм составляет 15 дБ, при вносимых потерях 0,6 дБ на длине 1,55 мкм.

5. Результаты физико-математического моделирования процессов формирования интегрально-оптических волноводных схем со сложными конфигурациями в силикатных стеклах методом многоэтапного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов, полученная на основе совместного прямого численного решения нелинейного двумерного уравнения диффузии и уравнения электростатики, в том числе для случаев значительного различия подвижностей ионов, и для двухслойных, частично-заглубленных волноводных конфигураций и волноводов с варьируемым уровнем заглубления. Результаты применения модели, в комбинации с полным векторным трехмерным методом расчета распространяющегося пучка и ряда других методик анализа оптических схем, для планирования параметров технологического процесса и оптимизации волноводных топологий, расчета характеристик и последующего изготовления базовых одномодовых компонен-

тов интегральной оптики, включая элементы направленной связи, а также матриц микролинз, для систем оптической связи на длине волны 1,55 мкм и различных сенсорных устройств.

6. Результаты комплекса исследований оптических свойств поверхностных плазмонов в различных волноводных конфигурациях и дифракционных наноструктурах, ориентированные на разработку и моделирование интегрально-оптического разделителя ТЕ/ТМ поляризаций на основе комбинированной волноводной структуры Y-разветвителя, состоящей из микрополоскового плазмонного и ионообменного стеклянного волновода, прототипа оптического биосенсора, использующего поверхностный плазмонный резонанс в металлодиэлектрической дифракционной решетке трапецидальной формы, а также направленные на расчет топологий щелевых волноводных схем плазмонной интегральной оптики.

7. Матрицы дальнефокусных микролинз (фокусное расстояние 2–4,5 мм) с плотным заполнением, полученные методом электростимулированной миграции ионов Ag^+ в стеклянных подложках, которые использованы для построения датчиков волнового фронта Шака-Гартмана с различными параметрами. Физико-математическая модель формирования микролинзовых растров в стекле методом электростимулированной миграции ионов.

8. Результаты анализа процессов распространения направленных волн в оптической схеме волнового мультиплексора оптических сигналов 1×4 с разнесением длин волн 20 нм в диапазоне 1,5–1,6 мкм на основе ионообменных волнопроводов с применением каскадов неравноплечных интерферометров Маха-Цендера, в схеме модового TE_0/TE_1 мультиплексора, и в оптических схемах широкополосных одномодовых многоканальных разветвителей оптических сигналов $1 \times N$ древовидной архитектуры и $2 \times N$ – с применением направленных ответвителей, а также разветвителей на основе межмодовой интерференции в квазипланарном волноводе, с учетом неравномерного деления мощности за счет эффекта когерентной связи излучательных и направленных мод, направленные на их изготовление с оптимизированными характеристиками. Результаты экспериментальных исследований многоканальных разветвителей оптического излучения, сформированных в стеклянных подложках.

9. Комплекс программных средств для полного векторного расчета и анализа поляризационных элементов интегральной оптики и микрооптики в стекле, а также волноводной плазмонной нанооптики.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и главе 1 (“Оптико-физические процессы и принципы построения интегрально-оптических элементов и устройств (литературный обзор)”) определено научное направление исследований, кратко описаны структура и содержание работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведен систематизированный обзор схмотехнических и физико-технологических методов формирования пассивных интегрально-оптических схем различного функционального назначения, обоснованы выбор темы диссертации и ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, описаны возможности практического применения результатов.

В главе 2 (“Разработка новых оптико-физических принципов и методов построения пассивных оптических волноводных поляризаторов, пространственных разделителей и преобразователей поляризации излучения”) предложены и обосно-

ваны новые методы пространственного разделения и преобразования поляризационных компонент оптического излучения и его поляризационной фильтрации, реализуемые посредством специальных планарных многослойных волноводных структур из изотропных диэлектрических слоев, построены соответствующие физико-математические модели, установлены необходимые для построения преобразователей поляризации закономерности гибридизации волноводных мод,

Предложен новый тип оптических поляризаторов на основе четырехслойных интегрально-оптических диэлектрических волноводов. Принцип работы поляризаторов базируется на особенностях модового двулучепреломления вблизи условий отсечки мод для пространственного разделения полей ТЕ- и ТМ-мод. В соответствии с подобранными параметрами поляризаторы могут выделять как ТЕ₀- , так и ТМ₀-моду. Поляризатор представляет собой составной волновод, в основе которого одномодовый каналный или планарный волновод, локально нагруженный высокопреломляющей диэлектрической пленкой. Схема поляризатора показана на рисунке 1(а). В четырехслойном волноводе при определенных интервалах толщины пленки имеет место существенное различие численных значений констант распространения и эффективных показателей преломления ТЕ- и ТМ-мод (~ 0,002), которому соответствует существенное разнесение в пространстве распределении их полей. Это дает возможность создавать простые и эффективные устройства для выделения либо ТЕ₀-моды, либо ТМ₀-моды.

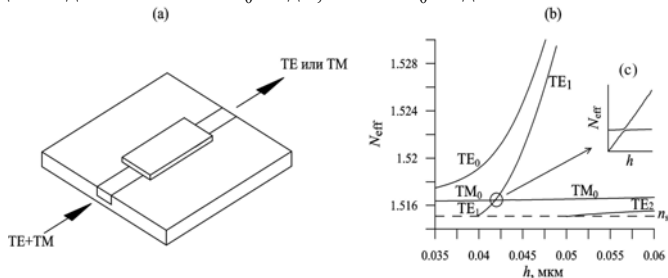


Рисунок 1 – а. Схематический вид конструкции универсального интегрально-оптического ТЕ- или ТМ-поляризатора; б. Зависимость эффективных показателей преломления мод волновода от толщины высокопреломляющей покровной пленки. На вкладке (с) - увеличенная часть этой зависимости в области толщин пленки, соответствующих максимальному сближения эффективных показателей преломления

Для исследований использовались каналный и планарный ионообменный волноводы в подложке из стекла. Высокопреломляющий слой представлял собой пленку из диэлектрического материала – сульфида мышьяка As_2S_3 с показателем преломления 2,4 (на длине волны 0,85 мкм). Поверх пленки располагалось воздушное полупространство.

Система волновых уравнений для поперечных компонент напряженности магнитного поля H_x и H_y для векторного анализа мод волновода имеет вид [14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2(x, y) - N_{eff}^2) H_x = 0 \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2(x, y) - N_{eff}^2) H_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где k_0 – волновой вектор вакуума, $k_0=2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения в вакууме, $n(x, y)$ – распределение показателя преломления в поперечном сечении волновода, N_{eff} – эффективный показатель преломления волноводной моды. Система уравнений (1) решалась методом конечных разностей с неравномерной сеткой для дискретизации вычислительного окна, при составлении общей разностной схемы учитывалась непрерывность тангенциальных компонент магнитного поля на границах раздела сред, образующих волновод.

На рисунке 1(b) показана расчетная зависимость эффективных показателей мод канального волновода от толщины покровной пленки. Особенности модовой структуры четырехслойного волновода использованы для создания поляризаторов и преобразователей поляризации оптического излучения. Как видно из данного графика, существует диапазон толщин пленки (43–50 нм), при котором эффективный показатель преломления мод TE_0 и TE_1 существенно превышает показатель преломления моды TM_0 , и других мод в этом интервале толщин пленки нет. О другой особенности волноводной характеристики – сближении кривых TM_0 - и TE_1 -мод и ее применении будет сказано ниже.

На рисунке 2 показаны распределения основной компоненты магнитного поля для всех мод оптического волновода с пленкой толщиной 50 нм, полученные путем решения полного векторного волнового уравнения методом конечных разностей. Как видно, моды TE_0 и TE_1 локализованы преимущественно в пленке, а мода TM_0 – под пленкой, в самом ионообменном слабонаправляющем волноводе. Такой волновод представляет собой ТМ-поляризатор.

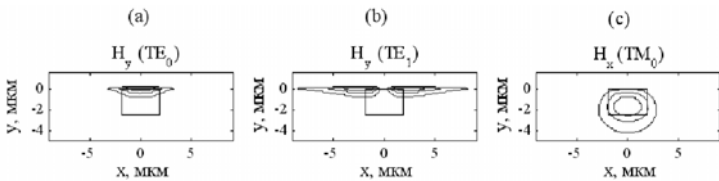


Рисунок 2. Контурные графики распределения компоненты магнитного поля H_x мод TE_0 и TE_1 - (a) и (b), соответственно, и компоненты H_x моды TM_0 - (c) у канального волновода с покровной пленкой толщиной 50 нм.

Такая ситуация с разнесением эффективных показателей преломления и полей мод повторяется и при больших толщинах пленки, по отношению к TE -моды следующего порядка (TE_2) и TM_0 -моды, с той лишь разницей, что теперь TE_2 -мода оказывается главным образом под пленкой в волноводе, а TM_0 -мода локализуется преимущественно в пленке. Это дает возможность создать TE -поляризатор.

Для расчета размеров поляризатора было проведено моделирование эволюции волн методом распространяющегося пучка. К примеру, при длине устройства 5 мм коэффициент экстинкции составляет 15 дБ для поляризаторов TE - и TM -типа. Зависимость коэффициента экстинкции от длины устройств в области ма-

лых длин пленки, показанный на рисунке 3, имеет характер затухающих осцилляций, что обусловлено эффектом направленной связи волноводной моды и части радиационных мод. Вносимые оптические потери в выделяемую моду составляют 0,1 дБ.

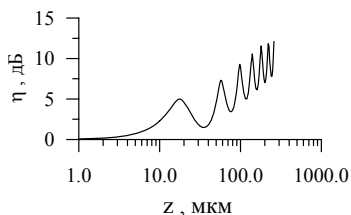


Рисунок 3 – Характерная зависимость коэффициента экстинкции ТМ-поляризатора от длины четырехслойного волновода в области малых длин пленки

Изготовлены наборы прямолинейных волноводов с различной толщиной покровной пленки, функционирующие как эффективные ТЕ- и ТМ-поляризаторы. Отдельные волноводы имели коэффициент развязки между излучением ТЕ- и ТМ-поляризаций более 25 дБ. Измеренные коэффициенты развязки даже превышали расчетные данные, что обусловлено рассеянием на неоднородностях пленки, которое отличается для ТЕ- и ТМ-мод из-за разного уровня локализации полей этих мод в ней. Вносимые потери в выделяемую моду определяются потерями собственно ионообменного волновода, которые не превышают 1 дБ. В целом результаты исследования различных образцов поляризаторов обобщены в Таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные результаты экспериментальных исследований образцов интегрально-оптических поляризаторов

Толщина пленки, мкм	Тип поляризационной чувствительности (ТЕ или ТМ)	Коэффициент развязки, дБ
0,03	ТМ	25
0,06	ТЕ	4
0,08	ТЕ	20
0,12	---	0
0,16	ТМ	10
0,17	ТМ	25
0,19	ТМ	8
0,22	ТЕ	12
0,23	ТЕ	23
0,29	---	0
0,32	ТМ	7
0,34	ТМ	20

С применением слабонаправляющего одномодового волновода в стеклянной подложке с покровной высокопреломляющей диэлектрической пленкой и на основе особенностей волноводных характеристик его мод предложен новый способ построения пассивных интегрально-оптических преобразователей плоскости поляризации оптического излучения, в двух вариантах его реализации.

Анализ поляризационных характеристик волновода, показанного на рисунке 1, проведенный путем полного векторного модового анализа позволил устано-

вить следующие фундаментальные закономерности формирования его волноводных мод. По мере роста толщины покровной пленки у моды TM_0 и моды TE_1 существует область ее толщины ($\sim 0,045$ мкм), в которой эффективные показатели преломления мод имеют близкие значения. Эта часть рисунка 1(b) перенесена на вкладку к рисунку. Однако мода TM_0 после прохождения этой области изменяет ориентацию своей поляризации и пространственную структуру поля и переходит в моду TE_1 , которая имеет два максимума интенсивности поля в своем пространственном распределении по горизонтальной оси. Моде TE_1 имеет ту же особенность – после указанной области сближения кривых эффективных показателей преломления эта мода трансформируется в моду TM_0 . В области с близкими значениями эффективных показателей преломления, в диапазоне толщины пленки 45–47 нм, обе моды имеют гибридный характер, с соразмерными поперечными компонентами электрического и магнитного полей, и их поляризация не является линейной.

С использованием фундаментального принципа модовой эволюции предложено создать оптические элементы для пассивного преобразования плоскости поляризации оптического излучения. Принцип работы преобразователей поляризации, показанных на рисунке 4 поясняется следующим образом. Подадим на входной торец волновода TM -поляризованное излучение. Это излучение возбуждает в волноводе моду TM_0 . Но при распространении волноводной моды в волноводе за счет постепенного адиабатического увеличения толщины пленки (см. рисунок 4(a)) или ее ширины (см. рисунок 4(b)), поляризация этой моды изменяется на 90° , и на выходе волновода будет существовать TE -поляризованная мода первого порядка.

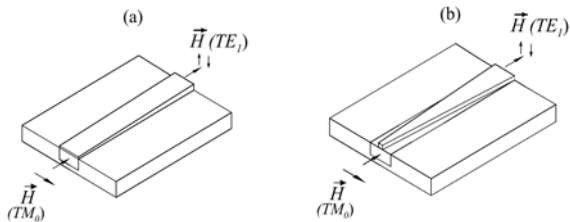


Рисунок 4 – Схематический вид волноводного преобразователя поляризации оптического излучения, использующего принцип модовой эволюции, с переменной толщиной (a) и шириной (b) покровного диэлектрического слоя.

Поляризации мод на входе и выходе преобразователя показаны на рисунке 5.

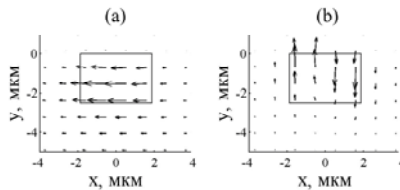


Рисунок 5 – Картина поляризации мод TM_0 и TE_1 на входе и выходе преобразователя - (a) и (b), соответственно.

Расчеты показывают, что спектральный диапазон преобразователя достаточно широкий и составляет 0,77–0,87 мкм. Он ограничен появлением, по мере уменьшения длины волны, четвертой моды TM_1 , что приводит к ухудшению поляризационных характеристик.

Вторая и третья моды волновода при толщинах пленки в области сближения эффективных показателей преломления имеют круговую поляризацию с взаимно противоположными направлениями. Между этими модами существует фазовый синхронизм, так как эффективные показатели обеих мод близки друг к другу. Преобразователь поляризаций во втором варианте своего исполнения представляет собой четырехслойный волновод на основе одномодового канала определенной длины, подобранной для интерференции двух распространяющихся гибридных мод с целью конверсии входной моды TM_0 в выходную моду TE_1 . Схема преобразователя показана на рисунке 6(a). Поляризации мод для толщины пленки 45 нм показаны на рисунках 6(b) и 6(c).

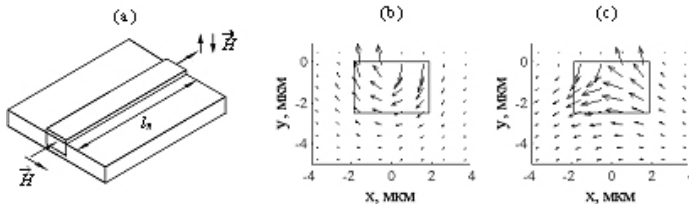


Рисунок 6 – а. Схематический вид волноводного преобразователя поляризации оптического излучения, использующего интерференцию гибридных мод; б и с. Картина поляризации второй и третьей моды волновода

Рассмотрим принцип работы преобразователя поляризаций. Подадим на входной торец волновода TM -поляризованное излучение, у которого вектор напряженности магнитного поля направлен горизонтально. Излучение возбуждает обе гибридные моды, которые при распространении интерферируют друг с другом. После прохождения определенного расстояния, равного половине длины биений мод, обе моды будут находиться в противофазе. Компоненты полей H_x обеих мод взаимно компенсируют друг друга, их суперпозиция в любой точке поперечного сечения волновода близка к нулю. Но совсем иная ситуация складывается с компонентами магнитного поля H_y этих мод. При той же длине волновода особенности пространственного распределения компонент поля H_y этих двух мод приведут к тому, что в результате их интерференции в любой точке поперечного сечения волновода данные компоненты будут суммироваться. Следовательно, на выходе волновода будет наблюдаться оптическое излучение от моды TE_1 , в котором вектор напряженности магнитного поля расположен вертикально.

Построенная физико-математическая модель показала возможность формирования преобразователей поляризации в диапазоне рабочих длин волн 0,63–1,55 мкм для любых слабонаправляющих волноводов, имеющих ступенчатый или градиентный профили показателя преломления и покрытых высокопреломляющей диэлектрической наноразмерной пленкой.

При создании прототипа преобразователя для формирования области эффективного взаимодействия гибридных мод диэлектрическая пленка наносилась клиновидным образом (с переменной толщиной) вдоль волноводного канала. Измеренная эффективность изготовленных ТМ-ТЕ преобразователей составляет 95%. Следует отметить, что непосредственно сам эффект преобразования поляризации впервые экспериментально был обнаружен исследовательской группой в Кубанском гос. университете ранее [15].

Проведены разработка и обоснование принципа функционирования нового волноводного преобразователя плоскости поляризации на основе асимметричного ионообменного волновода в стеклянной подложке, функционирующего как четвертьволновая пластинка, то есть преобразующего линейную ТЕ- или ТМ-поляризацию излучения в циркулярную. Прототипом для конструкции является преобразователь поляризации, предложенный в работе [16], но предлагается совершенно иной вариант использования асимметричного волноводного канала с целью создания преобразователя, схема которого показана на рисунке 7(а).

Оптический преобразователь поляризации выполнен на основе волновода с асимметричной формой поперечного сечения канала, под которой имеется в виду не только неравенство пространственных эффективных размеров сечения волновода, но и принципиальным в данном случае являются требования, чтобы, во-первых, такой волноводный канал был повернут на угол 45° относительно осей x и y в декартовой системе координат x - y - z , ориентированной относительно подложки, в которой волновод сформирован, и во-вторых, волноводный канал должен находиться вблизи области со значительно меньшим показателем преломления. Волновод с асимметричной формой канала, развернутого относительно осей подложки на угол 45° , может быть изготовлен по технологии ионного обмена с селективным заглаблением, при котором на этапе заглабления маскирующий слой закрывает половину поверхности оптического волновода (см. рисунки 7(б) и (с)).

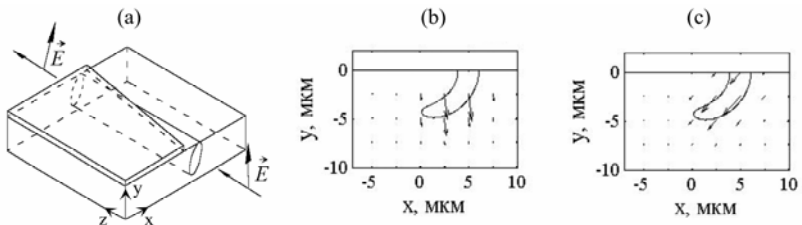


Рисунок 7 – а. Схема интегрально-оптического пассивного преобразователя линейной поляризации излучения в круговую; б и с. Картины поляризации первой фундаментальной моды волновода, с воздушным покрывным слоем и покрытого диэлектрической пленкой, соответственно

Часть поверхности над волноводным каналом покрыта диэлектрическим слоем с показателем преломления, равным показателю преломления подложки (см. рисунок 7 (а)). В той части поверхности над волноводом, где пленка отсутствует, покрывной областью является воздушная среда.

Для расчета поляризационных характеристик преобразователя был использован векторный метод распространяющегося пучка [17]. Определяющая система волновых уравнений в параксиальном приближении имеет вид:

$$\begin{cases} 2ik_0n_0 \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial z} = \frac{\partial^2 \mathcal{E}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 \mathcal{E}_x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 \mathcal{E}_y)}{\partial y} \right) - \frac{\partial^2 \mathcal{E}_y}{\partial x \partial y} + k_0^2 (n^2 - n_0^2) \mathcal{E}_x \\ 2ik_0n_0 \frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 \mathcal{E}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 \mathcal{E}_y)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial (n^2 \mathcal{E}_x)}{\partial x} \right) - \frac{\partial^2 \mathcal{E}_x}{\partial y \partial x} + k_0^2 (n^2 - n_0^2) \mathcal{E}_y, \end{cases} \quad (2)$$

где \mathcal{E}_x , \mathcal{E}_y – поперечные компоненты волнового пакета, связанные с поперечными компонентами электрического поля E_x, E_y соотношением

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y, z) \\ E_y(x, y, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_x(x, y, z) \\ \mathcal{E}_y(x, y, z) \end{pmatrix} \exp(-ik_0n_0z),$$

n_0 – средний (опорный) показатель преломления волнового пакета. Система уравнений (2) решалась методом конечных разностей с неравномерной сеткой. По периметру вычислительного окна использованы граничные условия идеально согласованного слоя PML.

На рисунках 7(b) и (c) представлены картины поляризации одной из 2-х фундаментальных мод волновода с воздушным покровным слоем и покрытого диэлектрической пленкой с показателем преломления, равным показателю преломления подложки, соответственно. Как видно, в первом случае мода линейно поляризована, вектор напряженности электрического поля ориентирован перпендикулярно границе раздела подложки с воздушной средой, то есть это квази-ТМ мода. Причина такой конфигурации поляризации состоит в близости воздушного слоя к волноводному каналу. Во втором случае та же самая мода также линейно поляризована, но вектор напряженности поля направлен вдоль длинной части сечения волноводного канала.

За счет плавной вариации распределения показателя преломления покровной среды по оси x вдоль волновода, данная волноводная схема будет преобразовывать линейную ТЕ- или ТМ-поляризацию излучения в циркулярную. На рисунке 7(a) показано преобразование входной ТМ-волны. Расчетные значения угла поворота поляризации составляют $-42,4^\circ$ и $47,6^\circ$ при входном ТЕ- и ТМ- излучении, соответственно.

На основе четырехслойного диэлектрического волновода (слабонаправляющего канала с высокопреломляющей покровной пленкой - см. рисунок 1(a)) предложен новый способ построения оптического полосо-заграждающего фильтра для применения в составе волноводных усилителей оптического излучения для подавления усиленного спонтанного излучения от лазера накачки. Принцип работы спектрального фильтра основан на особенностях дисперсионной характеристики ТЕ- или ТМ-мод различных порядков. А именно, для определенной поляризации оптического излучения, ТЕ или ТМ, существуют значения длин волн, при которых поля всех мод составного волновода оказываются локализованными преимущественно в верхнем слое с пленкой. Поэтому введенное в канальный четырехслойный волновод излучение с этими длинами волн будет эффективно рассеиваться при его прохождении. Результаты расчетов параметров

фильтра, проведенные путем анализа его модовой структуры: коэффициент пропускания фильтра для подавления излучения лазера накачки эрбиевого усилителя с длиной волны 0,98 мкм составляет 15 дБ, при вносимых потерях 0,6 дБ на рабочей длине 1,55 мкм.

Предложен новый метод разделения ТЕ- и ТМ-волн в интегрально-оптическом Y-разветвителе. Метод разделения ТЕ - и ТМ-волн базируется на известном принципе селекции мод в асимметричном Y-разветвителе [18], но модовое двулучепреломление можно создать путем подбора параметров волноводов на основе диэлектрических изотропных слоев.

Разделитель поляризаций основан на асимметричном Y-разветвителе на основе канальных волноводов в стеклянной подложке. Схематический вид пространственного разделителя поляризаций показан на рисунке 8(а). Часть поверхности разделителя покрывается высокопреломляющей пленкой подобранной толщины для организации зоны с различными константами распространения для обеих поляризаций. Параметры четырехслойного волновода соответствуют параметрам ТМ-поляризатора, который создается по описанному выше новому принципу построения поляризаторов. Часть канального волновода на входе и выходе схемы должна быть покрыта пленкой клинообразной или рупорообразной конфигурации для эволюционной трансформации формы ТЕ-поляризованной волны. В целом предложенная структура обладает свойствами адиабатического перехода, то есть мощность оптического излучения, введенная в одну из собственных мод, должна переноситься посредством именно этой моды.

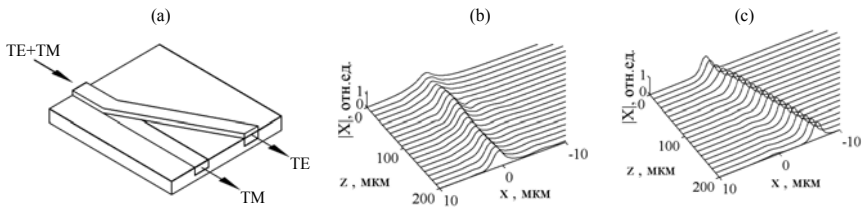


Рисунок 8 – а. Схематический вид пространственного разделителя ТЕ/ТМ-волн на основе интегрально-оптического асимметричного Y-разветвителя; б и с. Картина распространения ТМ- и ТЕ-волн в разветвителе.

С применением метода распространяющегося пучка была построена физико-математическая модель разработанных ТЕ/ТМ-разделителей поляризации. На рисунках 8(б) и (с) показаны картины распространения ТМ- и ТЕ-поляризованного излучения в разветвителе. $X=X(x,z)$ – составляющая электрического или магнитного поля направленной волны вдоль оси x , для ТЕ излучения $E_x=Y(y)X(x,z)$, для ТМ излучения $H_x=Y(y)X(x,z)$, где $Y(y)$ – составляющая поля вдоль оси y . Эффективность развязки между каналами (отношение мощностей в каждом из каналов) имеет значение 28 дБ для волн ТЕ-поляризации и 25 дБ для волн ТМ-поляризации, вносимые потери при угле разветвления 2° пренебрежимо малы.

Предложен новый тип интегрального оптического разделителя поляризаций в стекле с применением металлодиэлектрических волноводов в схеме интерферометра Маха-Цендера на основе направленных ответвителей. Принцип работы

разделителя поляризаций поясняется следующим образом: для ТЕ-поляризованной волны сдвиг фаз волн, которые прошли плечи интерферометра и достигли второго направленного ответвителя должен быть близок к нулю (без учета внесенного сдвига фаз в первом направленном ответвителе), а для ТМ-поляризованных волн тот же сдвиг фаз должен быть равен π . Предложено создать заданное модовое двулучепреломление за счет использования свойств поверхностных плазмон-поляритонов путем нанесения наноразмерной пленки серебра некоторой длины через буферный слой оксида кремния на поверхность волновода. В качестве основы интегральной схемы использовался одномодовый канальный волновод в подложке из стекла.

Произведен подбор параметров волноводной структуры, обладающей указанными свойствами, при дополнительном требовании малых вносимых потерь. Результаты расчета разделителя поляризаций состоят в следующем: если исходить из приемлемой величины потерь волновода для ТМ-поляризованных волн в 1 дБ, то величина разности эффективных показателей преломления ТМ₀-моды волноводов, образующих плечи интерферометра, $-\Delta N_{\text{ТМ}}$ будет иметь значение $2 \cdot 10^{-5}$ при толщине буферного слоя 0,6 мкм и при толщине металлической пленки 30 нм. При этих параметрах, с целью формирования указанного сдвига фаз двух ТМ-волн длина покровной металлической пленки должна быть принята равной 1,5 см. Аналогичная величина $\Delta N_{\text{ТЕ}}$ у волноводов в плечах интерферометра составляет величину в 10 раз меньшую величины $\Delta N_{\text{ТМ}}$. При таком значении модового двулучепреломления эффективность развязки между каналами на выходе разделителя поляризаций составляет 17 дБ для ТЕ-волн. Эти же данные соответствуют 100% перекачке энергии в один выходной канал для ТМ-волн.

В главе 3 («Модифицированные физико-технологические приемы и особенности формирования компонентной базы интегральной фотоники в стеклах») проведено трехмерное физико-математическое моделирование процесса формирования волноводных схем в подложках из силикатных стекол с высоким содержанием оксидов щелочных металлов методом многоэтапного бинарного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов. В комбинации с методиками анализа волноводных оптических схем, данная модель применялась для планирования параметров технологического процесса и оптимизации волноводных топологий, расчета оптических характеристик и последующего изготовления основных одномодовых компонентов интегральной оптики. При этом имелась в виду следующая задача взаимоувязанных расчетов и экспериментальных исследований – создание компонентной базы интегрально оптических схем, применяемых в оптических сенсорных устройствах и в системах оптической связи.

Изготовление одномодовых волноводных структур в стеклянных подложках включает в себя этапы: простого или электростимулированного ионного обмена в расплавах нитратов металлов; электростимулированного заглабления волновода; термического отжига волновода. В зависимости от типа создаваемой волноводной схемы, последний этап отжига, а иногда и этап заглабления не используется. Существуют более сложные методики формирования волноводных структур в несколько этапов. В частности, формирование волноводов в два расположенных один под другим слоя реализуется за счет последовательного выполнения операций ионного обмена и заглабления сначала одного канала, а поверх него второго. Частичное заглабление волноводного канала реализуется через маску, закрывающую часть поверхности волновода. Варьируемый уровень заглабления в пределах

единой интегрально-оптической схемы осуществляется за счет маски специальной формы, располагаемой на этапе заглабления с тыльной стороны стеклянной подложки.

Для формирования волноводных структур с низкими потерями в заданном интервале длин волн и возможностью сопряжения с электронными схемами в работе использовались оптическое стекло К-8 и фотопластины, и такие диффузанты, как серебро и калий, процесс формирования интегрально-оптических схем производился в расплавах солей $\text{AgNO}_3:\text{NaNO}_3$ и KNO_3 квалификации “ЧДА”. Описывающее любой этап данного технологического процесса нелинейное уравнение диффузии, в общем случае, в присутствии внешнего стимулирующего электрического поля имеет вид [6]:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{D_A}{1 - (1 - M)C_A} \cdot \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{(1 - M)}{1 - (1 - M)C_A} \left(\left(\frac{\partial C_A}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_A}{\partial y} \right)^2 \right) - \frac{q}{f k T} \left(E_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + E_y \frac{\partial C_A}{\partial y} \right) \right], \quad (3)$$

где $C_A(x, y)$ – относительная концентрация внедряемого иона A (серебра, калия, также могут применяться ионы таллия, рубидия, меди, цезия и т.п.), $C_A = c_A/c_0$, c_A – концентрация ионов A , c_0 – начальная концентрация ионов натрия в стекле; D_A – собственный коэффициент диффузии ионов A , M – отношение собственных коэффициентов диффузии иона A и натрия, $M = D_A/D_{Na}$; q , f , k , T – заряд электрона, коэффициент корреляции, постоянная Больцмана и температура по Кельвину соответственно. t – время диффузионного процесса. $E_x(x, y)$, $E_y(x, y)$ – декартовы компоненты напряженности стимулирующего электрического поля в стеклянной подложке. Решение уравнения (3) – пространственное распределение концентрации внедренного иона определяет распределение показателя преломления формируемой оптической микроструктуры. Граничные и начальные условия для рассматриваемой общей задачи ионного обмена зависят от типа процесса – термического ионного обмена либо миграции под действием электрического поля ионов через щель в металлической маске, полного либо селективного заглабления канала (в последнем случае маска закрывает только часть канала), заглабления с варьируемым уровнем (маска находится с другой стороны стеклянной подложки), а также термического отжига волновода.

В случае использования электростатического поля, прикладываемого для формирования или заглабления Ag^+ -волноводов уравнение диффузии необходимо решать в комбинации с уравнением электростатики, в котором учитывается неоднородность ионной проводимости стекла в области внедрения ионов [6]:

$$\sigma(x, y) \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0,$$

где ϕ – потенциал статического поля, и общая ионная проводимость σ определяется следующим образом:

$$\sigma(x, y) = \frac{D_A c_0 q^2}{fkT} \left[\frac{1}{M} (1 - C_A(x, y)) + C_A(x, y) \right].$$

Либо, в упрощенном варианте, диффузионное уравнение решается в комбинации с уравнением Лапласа. Распределение напряженности электростатического поля рассчитывается по полученным значениям его потенциала в стеклянной подложке, при наличии маски определенной формы на поверхностях подложки или при ее отсутствии.

Проведено прямое численное решение нелинейного двумерного уравнения диффузии путем его прямой конечно-разностной дискретизации по схеме Кранка-Николсона с трансформацией исходного дифференциального уравнения к системе нелинейных уравнений с ее последующим решением. Указанный способ позволил получить решение, которое было стабильно в широком диапазоне отношения подвижностей обменивающихся ионов: от 0,01 до 1. Известные методики моделирования данного физического процесса нестабильны при отношении подвижностей ионов менее 0,1, что ограничивает класс описываемых процессов [6]. К примеру, ионный обмен серебро-натрий в распространенном боросиликатном стекле ВК-7 происходит с существенным различием подвижностей ионов, их отношение имеет значение порядка 0,01 [19]. Стекло отечественного производства К-8 имеет похожий состав.

Использование описанного выше нелинейного уравнения диффузии для моделирования различных оптических микроструктур возможно только при известных значениях коэффициента диффузии D_A , отношения коэффициентов диффузии обменивающихся ионов M и приращения показателя преломления Δn на поверхности. Проведено восстановление параметров Δn , D_A , M по измеренным значениям эффективных показателей преломления n_{eff} многомодовых планарных волноводов. Построена новая методика определения профиля показателя преломления планарного волновода, которому бы соответствовал профиль распределения концентрации диффузанта – решение уравнения (3). Методика была разработана на основе симплекс-метода многомерной оптимизации Нелдера-Милда. Она не требует информации о виде профиля показателя преломления волновода.

Разработанная методика была применена к моделированию термического и электростимулированного ионного обмена серебро-натрий и калий-натрий в различных типах стекол с целью определения технологических условий одномодового режима на различных длинах волн.

Данные, полученные путем реконструкции изготовленных планарных K^+ -волноводов в фотопластинах: коэффициент диффузии $D_A = 2,2 \cdot 10^{-15}$ м²/с (температура ионного обмена 380 С°). Приращение показателя преломления на поверхности $\Delta n = 0,0072$ для ТЕ-излучения, отношение подвижностей ионов калия и натрия $M = 1$. Данные, полученные путем восстановления профиля изготовленных планарных Ag^+ -волноводов в стекле К-8: коэффициент диффузии $D_A = 0,7 \cdot 10^{-15}$ м²/с, что соответствует температура ионного обмена 350 С°. Приращение показателя преломления на поверхности $\Delta n = 0,057$ (расплав смеси солей нитрата серебра и нитрата натрия в соотношении молярных долей 1:10), отношение подвижностей ионов серебра и натрия $M = 0,03$.

K^+ -волноводы и волноводные структуры экспериментально изготавливались и исследовались с целью их применения в сенсорных микросистемах. В случае ионного обмена $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ задачи расчета состояли в определении технологических

режимов изготовления одномодовых волноводов с дополнительными этапами электростимулированного смещения волноводного канала вглубь подложки (так называемого заглабления канала) и, при необходимости, его отжига. Такие волноводы формируются для волноводных схем, применяемых в оптической связи в диапазоне длин волн 1,3–1,55 мкм.

Ширина щели в маске была выбрана 2 мкм по соображениям получения одномодового режима для канальных K^+ -волноводов на длинах волн 0,63 и 0,85 мкм и оставлена такой же величины для Ag^+ - волноводов.

Характерные численные результаты моделирования трехэтапного процесса создания Ag^+ -волновода, совместимого с волоконным световодом на длине волны 1,55 мкм состоят в следующем. Волновод, сформированный посредством термического ионного обмена $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ из расплава солей $AgNO_3:NaNO_3$ (1:10) через маску с шириной щели 2 мкм в течении 15 минут при температуре 350 $^{\circ}C$, заглабленный за время 1500 с при той же температуре на уровень 9 мкм при стимулирующем напряжении 350 В и подвергнутый отжигу при той же температуре в течении 50 минут обладает профилем показателя преломления, аппроксимируемым гауссовой функцией со следующими параметрами: приращение показателя преломления волновода и значения его эффективной ширины $2d_x$ и высоты $2d_y$: $\Delta n = 0,0057$, $2d_x = 8,6$ мкм, $2d_y = 8,0$ мкм. Эффективные размеры электрического поля моды по оси x и y составляют 10,6 мкм и 9,9 мкм. Профили концентрации ионов серебра после первого, второго и третьего этапа формирования волновода показаны на рисунках 9(a1)-(c1), а на рисунках 9(a2)-(c2) показаны соответствующие распределения полей моды TE_0 . На длине волны 1,3 мкм волновод также является одномодовым, имеющим размеры поля моды $9,2 \times 8,8$ мкм.

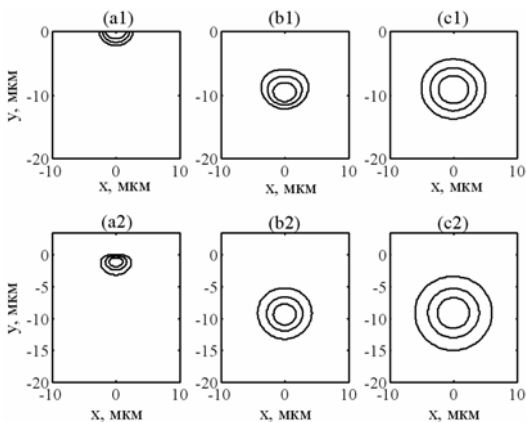


Рисунок 9 – a1-a2. Типовое распределение концентрации ионов серебра в волноводе, полученного путем термического ионного обмена – (a1), и соответствующее распределение электрического поля фундаментальной моды – (a2); b1-b2. Характерное распределение концентрации ионов серебра в волноводе в результате электростимулированного заглабления ионообменного волновода – (b1) и соответствующее распределение электрического поля фундаментальной моды одномодового волновода – (b2); c1-c2. Характерное распределение концентрации ионов серебра в волноводе в результате отжига заглабленного ионообменного волновода – (c1) и соответствующее распределение электрического поля фундаментальной моды одномодового волновода – (c2)

Следует отметить, что путем подбора параметров технологического процесса возможно создание волоконно-совместимых волноводов и схем на их основе в 2 этапа путем формирования канала и его заглабления, без использования этапа отжига волновода. Результаты исследования влияния соотношения стимулирующее напряжение/время заглабления на параметры моды волновода показаны в Таблице 2 при стимулирующем напряжении от 150 до 500 В для случая формирования волновода по схеме: термический ионный обмен и стимулированное заглабление. Уровень заглабления в численном эксперименте для всех волноводов был единый – 9 мкм, соответственно время заглабления при увеличении напряжения уменьшается. В Таблице 2 приведены также значения эффективности стыковки таких волноводов с волокном.

Таблица 2 – Расчетные параметры профиля показателя преломления (п/п) и фундаментальной моды волновода, заглабленного на уровень $y_0 = 8,9$ мкм при температуре 350 С° и эффективность его прямой стыковки с волокно SMF-28.

Стимулирующее напряжение, В	Время заглабления, с	Число мод	Приращение п/п, Δl	Эффективный горизонтальный и вертикальный размеры профиля показателя преломления $2d_x / 2d_y$, мкм	Эффективный горизонтальный и вертикальный размеры поля моды $2w_x / 2w_y$, мкм	Эффективность прямой стыковки с волонком SMF-28, %	Потери при прямой стыковке с волонком, дБ
150	3500	1	0,0064	7,8 / 6,9	10,1 / 9,3	98,8	0,05
200	2500	1	0,0084	6,9 / 6,2	8,8 / 8,2	97,2	0,13
250	2000	1	0,0101	6,5 / 5,7	8,1 / 7,6	94,9	0,23
300	1750	1	0,0113	6,3 / 5,4	7,7 / 7,3	93,1	0,3
350	1500	1	0,0124	6,1 / 5,1	7,3 / 6,9	91	0,40
400	1300	1	0,0135	5,9 / 4,9	7,0 / 6,7	88,9	0,50
450	1100	1	0,0151	5,5 / 4,7	6,7 / 6,3	86,5	0,63
500	950	1	0,0164	5,1 / 4,6	6,5 / 6,1	84,1	0,75

Примечание. Рабочая длина волны – 1,55 мкм. Для расчетов принято, что исходный волновод получен путем термического ионного обмена в течении 15 минут при той же температуре.

Различие заглабления Ag^+ -волновода при разных стимулирующих напряжениях заключается в том, что профиль концентрации является более симметричным относительно оси x при низких стимулирующих напряжениях и больших временах процесса заглабления. Лучшее согласование волновода с волокном при таких условиях связано с большим влиянием на форму профиля концентрации диффу-

зионной составляющей процесса внедрения ионов по сравнению с дрейфовой составляющей.

Подобная модель было построена для случая электростимулированного формирования волновода и электростимулированного заглабления. Характерные результаты вычислений: волновод в подложке из стекла К-8 толщиной 2 мм, полученный путем электростимулированного внедрения ионов Ag^+ в стекло из расплава солей $AgNO_3:NaNO_3$ через маску с шириной щели 2 мкм в течении 40 с при температуре 350 °С, заглабленный за время 1400 с при той же температуре на уровень 8 мкм при стимулирующем напряжении 350 В, обладает профилем показателя преломления с параметрами: приращение показателя преломления волновода $\Delta n=0,0054$, эффективная ширина и высота $2d_x=5,7$ мкм, $2d_y=4,8$ мкм. Профили нормализованной концентрации ионов серебра после первого и второго этапа изготовления волновода показаны на рисунках 10(a1-b1), а на рисунках 10(a2-b2) показаны соответствующие им распределения электрического поля моды TE_0 . Для сравнения, на рисунке 10(c) показано распределение электрического поля моды HE_{11} стандартного телекоммуникационного волокна SMF-28.

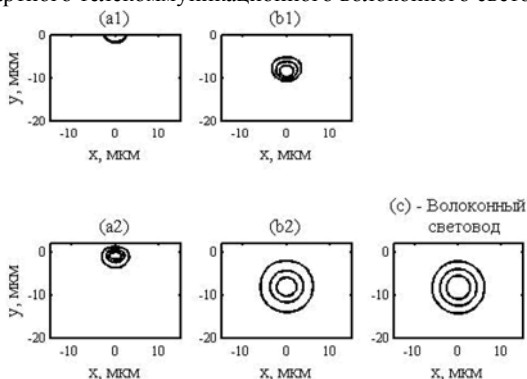


Рисунок 10 – Двумерный профиль нормализованной концентрации ионов серебра в волноводе – (a1-b1) и соответствующие распределения электрического поля фундаментальной моды – (a2-b2);

(a1-a2) – после электростимулированного формирования волновода, (b1-b2) – после электростимулированного заглабления волновода; (c) – распределение электрического поля моды волоконного световода SMF-28

Рассмотрен более сложный вариант частичного заглабления волноводного канала, которое может быть использован как для построения преобразователей поляризации (см. рисунок 7), так и для организации передачи оптической энергии от заглабленного волновода к волноводу, расположенному в приповерхностном слое стекла [4]. Результаты моделирования формирования асимметричного канала, которые использовались для расчетов одного из описанных выше преобразователей поляризации, представлены на рисунке 11. На рисунках 11(a) и 11(b) представлены распределения показателя преломления волновода после этапа термического ионного обмена и после этапа селективного заглабления. На рисунке 11(c) показаны силовые линии электростатического поля, которое прикладывается на этапе заглабления волновода с маской, закрывающей правую половину поверхности подложки над волноводом.

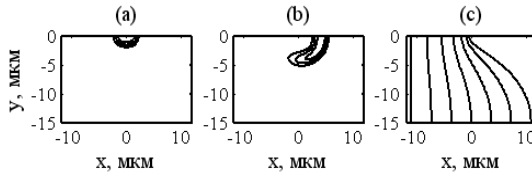


Рисунок 11 – Распределение показателя преломления волновода после этапов термического ионного обмена и после этапа селективного заглабления – (а) и (b), соответственно; (с) - силовые линии электростатического поля этапа заглабления волновода

Построена модель формирования волноводного канала в подложке из стекла К-8, в котором заглабление выполняется с маской, клинообразно (по поперечной оси x) покрывающем поверхность волновода. Определено что при угле, образованном осью волновода и краем маскирующего слоя менее $1,5^\circ$ смещение распределения концентрации волновода вдоль оси x , вызванное ориентацией и плотностью силовых линий электростатического поля вблизи края маски не влияет на потери оптической энергии в волноводе.

Возможен другой вариант варьирования по вертикальной оси заглабления, с маской клинообразной формы, размещенной с тыльной стороны стеклянной подложки с волноводом (см. рисунок 12(a)). Была произведен расчет распределения электростатического поля для такого способа заглабления. На рисунке 12(b) представлено векторное распределение напряженности электростатического поля в области заглабления при ширине маски 50 мкм. На рисунках 12(c) и (d) показаны распределения электрического поля моды заглабленного и незаглабленного волновода, соответственно

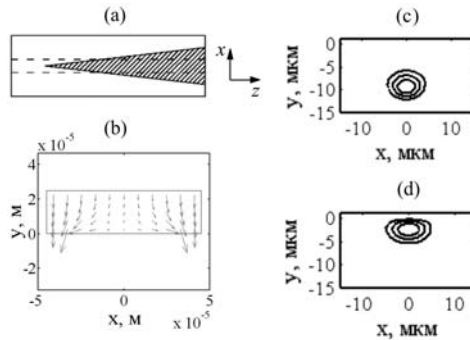


Рисунок 12– а. Расположение волновода и маски согласно второму способу селективного заглабления ионообменного волновода - вид снизу подложки;
 б. Распределение вектора напряженности электростатического поля в области заглабления и вблизи него при ширине экранирующей маски 50 мкм;
 с и d. Контуры распределения показателя преломления волновода, формируемого путем заглабления ионообменного Ag^+ -волновода в случае отсутствия маски под волноводом – (с) и в случае указанной ширины маски – (d).

Проведено моделирование процессов изготовления оптических волноводов в два слоя, смещенные друг относительно друга в вертикальном направлении. Рас-

четы осуществлялись для определения параметров технологического процесса изготовления волноводов с близкими параметрами, функционирующими в одномодовом режиме на длине волны 1,55 мкм в стекле К-8 и имеющими эффективные размеры моды, близкие к размеру моды стандартных телекоммуникационных волоконных световодов. Результаты расчетов показали, что для этой цели концентрация расплава для второго ионного обмена должна быть в два раза ниже, чем для первого этапа. Ширина щели в маске для этих этапов также должны быть различная: для первого этапа – 2 мкм, для второго этапа – 5 мкм.

Результаты расчетов распределений показателя преломления заглубленных волноводов и их модовых полей показаны на рисунке 13.

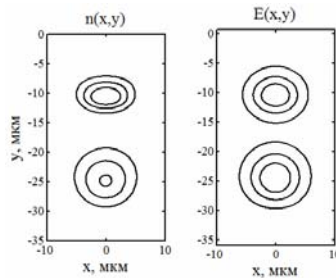


Рисунок 13 – Профиль показателя преломления заглубленных в 2 слоя волноводов – $n(x,y)$ и распределение электрического поля мод волноводов – $E(x,y)$.

Размеры электрического поля моды нижнего волновода по оси y и x – 10,4 мкм и 9,6 мкм, соответственно, уровень заглубления относительно поверхности подложки – 24,5 мкм. Для верхнего волновода те же размеры имеют значения 9,5×8,2 мкм, глубина заглубления 10,4 мкм. Направленная связь волн между волноводами с указанными размерами полей мод и со смещением друг относительно друга на 14 мкм проявляться не будет – длина биений супермод волноводов составляет 3 м. Расчетные значения профиля показателя преломления для нижнего (по рисунку 13) волновода: приращение показателя преломления $\Delta n=0,006$, эффективные размеры профиля $2d_x=9,8$ мкм по горизонтальной координате, $2d_y=9,3$ мкм по вертикальной координате. Те же параметры для верхнего волновода имеют следующие значения – $\Delta n=0,008$, $2d_x=8,5$ мкм, $2d_y=5,4$ мкм.

Изготовление, заглубление и отжиг волноводов производился в муфельной печи с системой терморегулирования; для переноса рисунка схемы с хромированного фотошаблона (изготовленного электронно-лучевой литографией) в маскирующий слой на поверхность подложки применялась УФ-фотолитография. Ряд волноводов и волноводных схем были изготовлены с применением установки безмасковой литографии Heidelberg μ PG-101. Большая часть исследований и измерений характеристик оптических волноводных структур проводились на вибрустойчивом стенде с применением торцевого ввода излучения в волновод. Для юстировки применялись прецизионные микропозиционеры, включая пьезотранслятор Thorlabs APB301 с точностью позиционирования 25 нм. Измерения модовых полей на длине волны 1,55 мкм проведены с помощью специа-

лизированной ПЗС-камеры Spigicon 503U-1550. Фотография базовой части станда приведена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Фотография базовой части станда для проведения измерений интегрально-оптических элементов и схем

Канальные одномодовые K^+ -волноводы в подложке из стекла К-8, создавались путем вариаций времени диффузии и использования фотошаблонов с различной шириной щели. Установлено, что одномодовый режим реализуется при длинах волн 0,63 мкм и 0,85 мкм для ширины щели шаблона 2 и 3 мкм и временах диффузии 70–100 минут при температуре 380 °С. Эффективные размеры модового пятна для длины волны 0,85 мкм – 6,3×8,1 мкм. В стеклянной подложке К-8 одномодовые на длине волны 1,55 мкм волноводы путем термического ионного обмена были сформированы за 9 часов при повышенной температуре 440 °С, размеры поля моды – 15×20 мкм. Физическая причина значительного расхождения с результатами расчетов на длине волны 1,55 мкм состоит в значительном механическом напряжении в подложке, что приводит к “насыщению” эффективной глубины диффузии [20].

В подложках из фотопластин одномодовые на длине волны 1,55 мкм волноводы были получены с более приемлемыми размерами. Ионный обмен проводился при температуре 380°С, время ионного обмена – 3 часа, ширина щели в массе – 3 мкм. На рисунке 15 показано измеренное распределение интенсивности на торце такого волновода. Размеры модового поля составили 11х7 мкм.

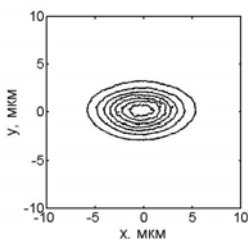


Рисунок 15 – Измеренное распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце K^+ -волновода в подложке из стекла

Следует отметить, что применимость модели бинарных ионообменных процессов $\text{Ag}^+\text{-Na}^+$ для использованного в работе бишлочного оптического стекла К-8 основана на различии подвижностей ионов серебра и калия при используемых технологических параметрах. Кроме того, был проведен ряд экспериментов по изготовлению Ag^+ -волноводных структур в смеси расплавов азотнокислого серебра, натрия и калия, что, по литературным данным [19] должно блокировать выход калия и подавлять механические напряжения в приповерхностном слое стекла. Однако не было установлено особого различия в оптических характеристиках изготовленных волноводов по сравнению с аналогичными волноводами, изготовленными в стекле К-8 из расплава $\text{AgNO}_3\text{:NaNO}_3$.

Для формирования Ag^+ -волноводов в стеклянной подложке типа К-8 использовался разбавленный расплав $\text{AgNO}_3\text{:NaNO}_3$ в соотношении 1:200 моль для уменьшения вероятности образования коллоидных частиц серебра на поверхности стекла и под краями маски, из-за которых резко увеличивается затухание. По той же причине алюминиевая маска подвергалась окислению в воздушной атмосфере. Симметризации профиля волновода способствовал выбор малой ширины щели – 2 мкм. Подобраны условия формирования одномодовых каналов по схемам термической обмен + стимулированное заглабление и стимулирование внедрение + стимулированное заглабление.

Изготовленные Ag^+ -волноводы со следующими технологическими параметрами: ионный обмен в разбавленном расплаве $\text{AgNO}_3\text{:NaNO}_3$, в соотношении 1:200 моль, в течении 100 минут при $350\text{ }^\circ\text{C}$; заглабление при 290 В (сила тока 10–15 мА) в течении 80 минут при $350\text{ }^\circ\text{C}$, обладали размером модового пятна на длине волны 1,55 мкм $11,4*10,4$ мкм при его гауссовой аппроксимации. На рисунке 16 представлены контуры интенсивности поля на выходном торце заглабленного Ag^+ -волновода. Для сопоставления на том же рисунке показано измеренное поле моды волоконного световода типа SMF-28 с эффективным диаметром 10,3 мкм.

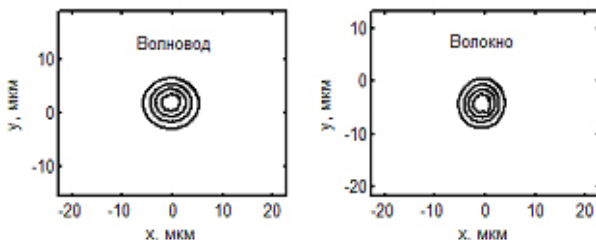


Рисунок 16 – Измеренное распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце заглабленного Ag^+ -волновода в стекле и распределение излучения на торце волоконного световода SMF-28.

Для измерения потерь волновода применялись три различные методики – метод половинного деления образца, метод с измерением прямой и отраженной мощности излучения (использовался измеритель обратного рассеяния JDSU ORL-55) и метод, основанный на пропускании через образец оптического излучения поочередно в двух взаимно противоположных направлениях с измерением выходной мощности. Измеренные потери по разным методикам согласуются между собой и составили ~ 1 дБ/см. Потери в волноводах обусловлены главным образом погло-

щением оптического излучения частицами коллоидального серебра, присутствующего в волноводных каналах, что свидетельствует о необходимости подбора подходящих стеклянных матриц. Также понижение потерь в волноводе возможно при использовании диэлектрических маскирующих слоев при изготовлении волноводов.

Согласно второму и третьему из указанных методов измерения потерь возможно отдельное определение потерь на стыковку волновода с волокном, которые вычлняются из общих величины потерь. Измеренные потери на длине волны 1,55 мкм составили $\sim 0,3$ дБ на одно соединение с использованием иммерсионной жидкости, либо специального оптически прозрачного клея с УФ-фотополимерацией.

С указанными технологическими параметрами был сформирован и селективно заглубленный волновод. На рисунке 17 представлены контуры интенсивности волноводной моды. Волновод на длине волны 1,55 мкм поддерживает одну моду.

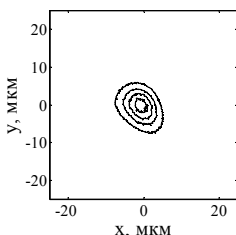


Рисунок 17– Измеренное распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце селективно заглубленного Ag^+ -волновода в стеклянной подложке

Для разработки базовых элементов одномодовых интегрально-оптических схем различных топологий (см. рисунок 18) с прогнозируемыми оптическими характеристиками был применен трехмерный конечно-разностный метод распространяющегося пучка, использованный совместно с описанной выше методикой решения нелинейного уравнения диффузии, по которой определяется концентрационный профиль волноводной структуры. Создано соответствующее программное обеспечение. По построенной модели интегральной схемы создавался чертеж фотошаблона, по которому изготавливалась интегрально-оптическая схема. Оптимизация схемы производилась путем итеративной коррекции технологических и геометрических параметров волноводной схемы. В приведенных ниже результатах расчетах волноводных структур использовались указанные выше данные о канальных волноводах.

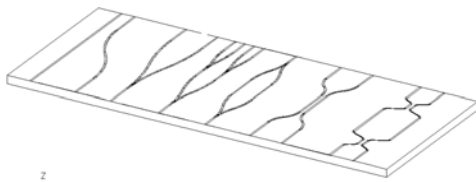


Рисунок 18 Схемы базовых интегрально-оптических одномодовых компонентов в стеклянной подложке

Проведены расчеты потерь S-изгибов различной функциональной формы. Использование S-изгибов косинус-формы и на основе дуг окружностей является предпочтительным, по сравнению с изгибами на основе прямолинейных сегментов, по причине значительно более низких потерь в них. Рассчитывалась зависимость радиационных потерь в зависимости от продольного смещения при фиксированном поперечном смещении. Для совместимых с волоконными световодами Ag^+ -волноводов в стекле приемлемые потери на излучение на уровне 0,1 дБ при смещении канала на 125 мкм достигаются при его продольной длине 3,7 мм (рабочая длина волны 1,55 мкм). Это соответствует радиусам кривизны изогнутых каналов 27 мм. Для K^+ -волноводов потери на уровне 0,1 дБ при организации смещения в 125 мкм достигаются при длине волновода 4,2 мм (рабочая длина волны 0,85 мкм), что соответствует радиусу кривизны 37 мм.

Проведена разработка оптимальной структуры Y-разветвителей. Размер Y-разветвителя в первую очередь определяется параметрами S-изгиба. Для ионообменных волноводов существует определенная специфика расчета волноводной области вблизи точки разветвления: когда каналы расположены близко друг от друга, единственной корректной методикой определения распределения показателя преломления в поперечном срезе разветвителя будет расчет процесса ионного обмена одновременно с двумя щелями, так как нельзя считать ионный обмен через обе щели независимыми друг от друга. Это некоторый единый диффузионный процесс, в результате которого под маской формируется область внедренных ионов определенной формы.

Для Y-разветвителей 1×2 рассчитывалась зависимость потерь на распространение в зависимости от продольного смещения S-изгибов в области разветвления при их фиксированном поперечном смещении. Результаты расчетов: потери оптической энергии в разветвителе на уровне 0,1 дБ достигаются при длине зоны разветвления, равной 4600 мкм для Ag^+ -волноводов и 7000 мкм для K^+ -волновода при стандартном расстоянии между выходными каналами 250 мкм.

Проведена разработка схем интегрально-оптических направленных ответвителей с различным коэффициентом деления мощности. Принимаются во внимание следующие соображения. Для построения ответвителей необходимо учитывать связь между волноводами и в участках, где они параллельны друг другу, и в области входного и выходного S-изгибов. Также необходимо провести выбор оптимального изгиба S-образного волновода с наименьшим затуханием, при заданном горизонтальном смещении, что приводит к увеличению длины устройства. С другой стороны, для минимизации собственных потерь в материале волновода или шероховатости стенок канала (для стеклянных волноводов данные потери составляют, как минимум, 0,1 дБ/см) следует изготавливать устройство минимальной длины. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо определять компромисс между радиационными потерями на изгибах и собственными потерями.

Характерные результаты расчета направленного ответвителя на основе Ag^+ -волноводов: длина связи ответвителя составляет 1750 мкм для 3 дБ-деления мощности между каналами рабочей на длине волны 1,55 мкм. Расчеты длины связи произведены для следующего комплекса параметров волноводной структуры: расстояние между каналами в центральной области связи 15 мкм, радиус кривизны S-изгибов 5,5 см, входные и выходные каналы разнесены на 250 мкм.

Параметры расчета ответвителя на основе K^+ -волноводов: 3-дБ деление мощности между каналами происходит при величине длины центральной области связи, равной 2080 мкм. Рабочая длина волны 0,85 мкм. Данный расчет произведе-

ден для следующих геометрических параметров ответвителя: расстояние между каналами в центральной области связи 11,0 мкм, радиус кривизны S-изгибов 7,0 см, входные и выходные каналы разнесены на 250 мкм.

Были разработаны топологии всех основных волноводных элементов, волноводные рисунки перенесены на фотошаблоны, и по подобранными для формирования одномодового режима технологическим параметрам изготовлены: S-изогнутые каналы, Y-разветвители на основе прямолинейных каналов и на основе S-изгибов с различной длиной области разветвления при фиксированном поперечном смещении в 250 мкм (эквивалентный угол разветвления до $3,5^\circ$), направленные ответвители с различной длиной связи в диапазоне 1-4 мкм с расстояниями между каналами 11 мкм и 15 мкм, интерферометры Маха-Цендера на основе разветвителей и на основе направленных ответвителей.

Изготовленные Y-разветвителей 1×2 на основе S-изгибов обладали равномерным распределением мощности по выходным портам. Измеренные коэффициенты разветвления всех разветвителей 1×2 составляют (в наихудшем случае) 53:47 %. Были изготовлены разветвители на основе Ag^+ -волноводов с радиусом S-изгибов ~ 60 мкм и на основе K^+ -волноводов с радиусом S-изгибов 100 мкм. В ходе измерений было установлено, что радиационные (излучательные) потери отсутствовали.

Измерены параметры изготовленных направленных ответвителей, в частности зависимость коэффициента разветвления в выходные порты от длины связи. 3-дБ деление оптической мощности с коэффициентами разветвления 55:45 % с обоих входных портов имеет место для K^+ -волноводов при длине связи 2300 мкм (расстояние между каналами 11 мкм, $\lambda=0,85$ мкм), для Ag^+ -волноводов коэффициенты разветвления составляли 52:48 % при длине связи 2200 мкм (расстояние между каналами 15 мкм, $\lambda=1,55$ мкм).

Изготовленные интерферометры Маха-Цендера длиной 40 мкм с разнесением плеч на 40 мкм на основе Y-разветвителей с применением K^+ -волноводов, с углом разветвления 1° , обладают суммарными излучательными потерями 0,35 дБ. Интерферометры Маха-Цендера были изготовлены и на основе направленных ответвителей с подобранной длиной 50% деления мощности, и соответственно, излучение пропускалось в перекрестный выходной порт.

Также в главе 3 изложены результаты комплекса исследований оптических свойств поверхностных плазмонов в микрополосковых и щелевых волноводных схемах.

Построена физико-математическая модель функционирования волноводного разделителя поляризаций с применение плазмонных микрополосковых и ионообменных волноводов. Поляризационный разделитель представляет собой асимметричный Y-разветвитель на основе канальных волноводов в стеклянной подложке, полученных методом ионного обмена, в котором часть поверхности покрывается пленкой серебра для формирования в зоне деления области с различными константами распространения для обеих поляризаций. Расчет параметров разветвителя проводился методом связанных волн на длине волны 1550 нм. Плазмонный волновод, обладает потерями для собственной моды ss_b^0 (TM_0) 1 дБ/см, для моды TE_0 0,15 дБ/см. Эффективность развязки между каналами составляет 14 дБ для TE-волн и 16 дБ для TM-волн. Общие потери составляют 2,5 дБ для TM-волн и 0,5 дБ для TE-волн. Общая длина устройства составляет 3 мм.

В главе 4 (“Прикладные аспекты построения новых функциональных устройств микрооптики”) приводится описание теоретических и экспериментальных исследований различных оптических схем для оптической связи и сенсорных устройств с применением элементов интегральной оптики и микрооптики в стекле, а также элементов плазмонной нанооптики.

В п. 4.1 работы представлены экспериментальные исследования ТЕ- и ТМ-поляризаторов и преобразователя поляризации на основе ионообменных волноводов в стеклах. Они были описаны выше.

Параграф 4.2 работы посвящен разработке и исследованию широкополосных интегрально-оптических многоканальных разветвителей $1 \times N$ и $2 \times N$, волновых и модовых мультиплексоров. Проведено исследование особенностей распространения направленных волн, а также взаимодействия направленных и излучательных волн в интегрально-оптических одномодовых схемах сложной топологии с применением Y-разветвителей, соединенных по древовидной топологии, широкополосных направленных ответвителей с целью создания многоканальных интегрально-оптических распределителей излучения и устройств на их основе. Рассматриваются волоконно-совместимые волноводные структуры, полученные методом ионного обмена серебро-натрий в стекле К-8 с последующим заглублением. Разветвители на основе незаглубленных волноводов являются основой предложенных в работе пространственных разделителей поляризаций излучения.

При создании широкополосных многоканальных разветвителей (диапазон 1270 нм – 1640 нм) необходимо, чтобы образующие их волноводы были одномодовыми. Путем решения двух- или трехэтапного уравнения диффузии подобраны интервалы параметров волноводов с одномодовым режимом в указанном диапазоне длин волн. Волновод с приращением показателя преломления волновода 0,0057 и с распределением показателя преломления, имеющим размеры $4,3 \times 4$ мкм, заглубленный на 9 мкм, удовлетворяет этим требованиям. Дисперсионная характеристика волновода с указанными параметрами показана на рисунке 19.

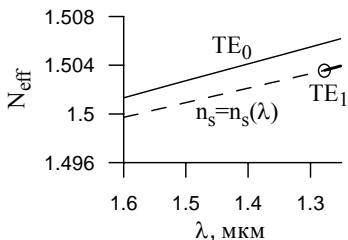


Рисунок 19 – Дисперсионная характеристика волновода для ТЕ-мод

Расчет многоканального разветвителя древовидной формы с N выходными каналами, формируемого каскадированием элементарных разветвителей с S-изгибом, сводится в определении, исходя из приемлемых размеров всего устройства, допустимого радиуса кривизны S-изгиба, обеспечивающего допустимые вносимые потери; определении длины входного прямолинейного волноводного сегмента, длины выходных волноводных сегментов, а также длины прямолинейных сегментов, которые связывают между собой смежные каскады многоканальной структуры. Общие размеры разветвителя определяются главным образом суммарной геометрической длиной S-изгибов. Минимальной длиной обладают S-изгибы на основе дуг окружностей. Подходящие радиусы кривизны S-изгибов

имеют минимальные значения 25 мкм–30 мкм. При технологически допустимой длине схемы 40 мкм можно создавать разветвители с разделением до 16 каналов с расстоянием между выходными каналами 250 мкм.

Учен эффект интерференции излучательных мод, порождаемых в S-изгибах, и направленной моды волноводной структуры, приводящий к колебаниям интенсивности на выходах Y-разветвителя и его неравномерным потерям [21], см. рисунок 20(а). Зависимость коэффициента разветвления разветвителя C_{11} от длины прямолинейного волновода L_3 , связывающего каскады разветвителя, приведена на рисунке 20(б), при радиусе кривизны S-изгибов 35 мкм. Как видно, данная зависимость носит характер затухающих осцилляций, приближаясь к идеальному значению коэффициента разветвления 25%. Для разветвителя 1×4 и при длине связующей секции 1 мкм значения коэффициентов разветвления составляют 26,4% и 23,6%, неоднородность потерь равна 0,4 дБ. Минимальная длина связующих прямолинейных секции каналов определяется допуском на неоднородность потерь.

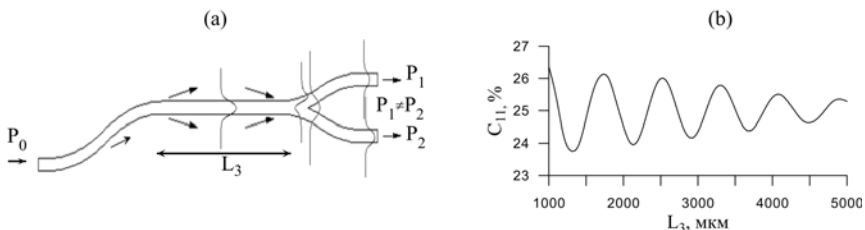


Рисунок 20 – а. Иллюстрация эффекта когерентной связи в многоканальном оптическом разветвителе; б. График характерной зависимости коэффициента разветвления от длины связующей волноводной секции (L_3)

Неточность центрирования разветвителя относительно стыкуемого с ним волоконного световода увеличивает мощность излучательных мод и также приводит к неравномерному делению мощности. Характерные результаты расчетов: при смещении волокна относительно волновода коэффициенты разветвления осциллируют относительно значения 0,5, затухая с ее увеличением. К примеру, при длине входной секции 2 мкм, при смещении волокна относительно волновода на 1,5 мкм потери составляют 4,8 дБ и 2,4 дБ. Длина входного волновода определяется точностью его стыковки с волокном.

Рассчитаны оптимальные топологии разветвителей 1×2, 1×4, 1×8. Построена картина распространения оптического излучения в разветвителе на длинах волн 1,2–1,6 мкм, определены потери и их неоднородность, рассчитана спектральная характеристика вносимых потерь и коэффициента затухания разветвителя. Для разветвителя 1×8 вносимые потери не превышают 9,8 дБ при максимальной неравномерности потерь 0,5 дБ.

Изготовлен одномодовый разветвитель 1×4. Измеренные коэффициенты разветвления составляют 27,5%, 23,4%, 23,1%, 26,0%. Радиационные (излучательные) потери разветвителя, измеренные путем сопоставления выходной мощности на выходе его каналов с мощностью оптического излучения на выходе прямолинейного канала, расположенного рядом с разветвителем, не превышают 0,3 дБ. Измерения проводились на длине волны 1,55 мкм. Параметры разветвителя: ра-

диус S-изгибов разветвителя – 40 мм, длина связующих прямолинейных секций – 2 мм. Общая длина всей схемы – около 17 мм.

Проведено исследование процессов межмодовой интерференции в квази-планарном слабнонаправляющем ионообменном градиентном Ag^+ -волноводе в стекле К-8 и осуществлена разработка одномодовых разветвителей оптического излучения, использующих в основе своего функционирования эту интерференцию. Волноводный MMI-разветвитель (MMI – multimode interference) состоит из входного одномодового канала, широкого квазипланарного многомодового волновода, в котором происходит разделение мощности оптического излучения на части, и выходных одномодовых каналов, имеющих форму S-изгибов. Физический принцип разделения мощности оптического излучения основан на отображении распределения электромагнитного поля оптического излучения, входного для многомодового волновода, на набор его идентичных образов, формирующихся на определенной длине волновода за счет интерференции распространяющихся волноводных мод. Схема разветвителя показана на рисунке 21(a). Установлено, что константа распространения мод многомодового волновода имеет квадратичную зависимость от индекса моды, что необходимо для формирования набора идентичных изображений входного излучения. Расчетное значение длины многомодового волновода разветвителя 1×5 на длине волны 1,55 мкм составляет 0,8 мм. На рисунке 21(b) показана картина распространения оптического излучения в разветвителе. Расчетное значение вносимых потерь разветвителя – 0,6 дБ. Продольная длина S-изгибов для разветвителя 1×5 составила 6,5 мм для разнесения всех выходных каналов на 250 мкм между собой.

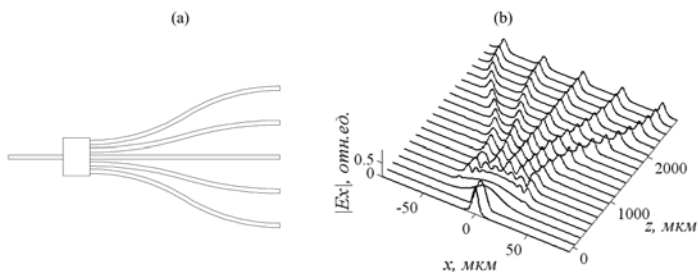


Рисунок 21 – а. Пространственная топология MMI-разветвителя 1×5 ;
 б. Картина распространения оптического излучения в разветвителе

Направленные ответвители используются для создания разветвителей с равномерным делением мощности и разветвителей $2 \times N$ – с двумя независимыми входными портами. С целью построения широкополосных устройств, с учетом анализа общих методик построения широкополосных направленных ответвителей [22], приемлемым для реализации на основе ионообменной технологии был признан вариант достижения ахроматических свойств у асимметричных направленных ответвителей, с разнесенными константами распространения. Характерные результаты расчетов: при Δn обоих волноводов ответвителя – 0,0057 и 0,0047 (что соответствует ширине щелей при изготовлении 2 мкм и 1,2 мкм) и при расстоянии между каналами 10 мкм длина связи для 3-дБ деления мощности составляет 350 мкм. Направленный ответвитель с такими параметрами имеет плоскую спектральную характеристику коэффициентов передачи мощности в диапазоне

1,5–1,6 мкм с максимальной неоднородностью потерь менее 0,6 дБ, что соответствует телекоммуникационным стандартам.

Произведен расчет оптимизированной волноводной схемы интегрально-оптического мультиплексора для CWDM-линий связи с длинами разделяемых волн 1550 нм, 1570 нм, 1590 нм и 1610 нм, на основе ионообменных заглубленных волноводах. Используется оптическая схема неравноплечного интерферометра Маха-Цендера с разделением и объединением волн в направленных ответвителях. К сведению автора, в научной литературе не описаны исследования, посвященные разработке мультиплексоров на число длин волн более 2 с применением волноводов, полученных ионным обменом. Разность длин плеч интерферометров – 40,8 мкм и 20,12 мкм. Расстояние между выходными каналами – 250 мкм, общая длина мультиплексора – 56 мм, расчетный коэффициент развязки между каналами – 24 дБ. Построена картина распространения оптического излучения в демльтиплексоре. Возможности ионообменной технологии ограничивают построение мультиплексоров на основе волоконно-совместимых волноводов в стекле с более плотной сеткой длин волн (менее 20 нм), так как при этом увеличивается разность длин плеч, и, с учетом допустимого радиуса кривизны S-изгибов, размеры устройства получатся неприемлемо большие. Уменьшение размеров схемы возможно при использовании волноводов с более высоким Δn , и введении в схему адаптеров поля моды.

В п.4.2 изложены принципы построения микрооптических сенсорных устройств с применением поляризационных интегрально-оптических схем и схем на основе поверхностных плазмонов.

Для разработки волноводных схем для биосенсорных микросистем, использующих эффект затухающего поля, технология формирования элементов интегральной оптики в стекле рассматривается как единая платформа для создания различных сенсоров. Исследованы физические и схемотехнические аспекты построения волноводных сенсоров с применением волноводов, полученных путем ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$.

В пределах одномодового режима волноводы отличаются по чувствительности сенсора S к изменению показателя преломления покровной среды n_c ($S = \frac{\partial N_{eff}}{\partial n_c}$), где N_{eff} – эффективный показатель преломления волноводной моды, так что необходим подбор их волноводных свойств, а не просто выбор одномодового волновода, стыкуемого с волоконным световодом. Зависимость чувствительности от эффективной глубины канального волновода имеет выраженный максимум. Результаты расчета: максимальная чувствительность $4,2 \cdot 10^{-4}$ соответствует эффективной глубине волновода 4,6 мкм ($n_c \sim 1,33$), что соответствует необходимому времени диффузии 105 минут при температуре 380 °С. Эффективная ширина канала – 7 мкм. Зависимость эффективного показателя преломления моды канального волновода от показателя преломления покровной среды в диапазоне показателя преломления водных растворов имеет линейный характер.

Результаты расчета сенсора на основе интерферометра Маха-Цендера: при указанном значении чувствительности минимальная регистрируемая величина изменения показателя преломления покровной среды составляет $5 \cdot 10^{-6}$ при длине сенсорного окна 30 мм и при использовании измерителя оптической мощности с разрешающей способностью 0,001 дБ. Длина всего устройства – 40 мм.

Проведена разработка биосенсора рефрактометрического типа с применением эффекта интерференции ортогонально поляризованных направленных волн в ионообменных оптических волноводах. Зависимость модового двулучепреломления калийного одномодового волновода от показателя преломления покровного слоя в диапазоне 1,33–1,37 носит линейный характер. При применении оптического тестера с разрешающей способностью 0,001 дБ минимальное изменение показателя преломления покровного слоя, которое может быть зарегистрировано, составляет для рассмотренного волноводного поляриметра $3 \cdot 10^{-5}$ при длине волновода 30 мм.

Проведен расчет чувствительности рефрактометрических волноводных сенсоров на основе K^+ -волноводов с покровной высокопреломляющей пленкой оксида титана (показатель преломления 2,3) Определена зависимость чувствительности сенсора от толщины пленки при показателе преломления внешней среды 1,33. Данная зависимость показана на рисунке 22.

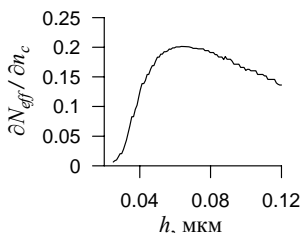


Рисунок 22 – График характерной зависимости чувствительности сенсора $\partial N_{eff} / \partial n_c$ от толщины покровной высокопреломляющей пленки калийного волновода

Как видно из графика, существует максимальное значение чувствительности, соответствующее определенной толщине пленки. Для TE_0 -моды эта толщина равна 63 нм, при этой толщине чувствительности сенсора составляет 0,2, Применение высокопреломляющей пленки, наносимой на волновод, приводит к значительному увеличению его чувствительности – в 400–500 раз, по сравнению с чувствительностью ионообменного волновода без пленки.

Предложен высокочувствительный оптический рефрактометр поляриметрического типа. В основе схемы сенсора-рефрактометра четырехслойная структура на базе волновода в стеклянной подложке, покрытого высокопреломляющей диэлектрической пленкой. Покровная пленка используется и в активной области взаимодействия с исследуемой средой и для формирования волноводного пространственного разделителя поляризаций, описанного в главе 2. 45°-ориентированный поляризатор, расположенный на выходе схемы, позволяет регистрировать на экране картину интерференции волн. Разрешающая способность такого сенсора при измерении изменений показателя преломления покровной среды составляет $1 \cdot 10^{-8}$, что соответствует регистрируемого сдвигу фаз ортогональных мод $5,5 \cdot 10^{-4}$ радиан при длине всего устройства 30 мм.

Представлено исследование по созданию матриц рефракционных дальнокорпусных микролинз для датчиков волнового фронта Шака-Гартмана. Форма микролинз в матрице была смоделирована заранее по описанной в главе 3 модели метода формирования оптических микроструктур в стекле путем электростимулированной миграции ионов. Изготовлены матрицы 200x267 микролинз с шагом 150 мкм, фокусным расстоянием 4,5 мм и диаметром фокального пятна 49 мкм. Матрица имеет высокую плотность упаковки – после дополнительного отжига стек-

лянной подложки с линзами диаметр каждой линзы равен 150 мкм. Большим достоинством микролинз, изготовленных методом электростимулированной миграции ионов, является то, что варьируя технологический процесс (дополнительный отжиг, изменение размеров и формы маски) и тип диффундирующего материала, возможно контролировать форму и размеры микролинз. Собранный датчик волнового фронта Шака-Гартмана на основе изготовленной матрицы микролинз при применении 8-битового ПЗС сенсора с размером пикселя 3 мкм позволил измерять искажения волнового фронта в динамическом диапазоне 14 мрад и с чувствительностью 2 мкрад.

Описано теоретическое и экспериментальное исследование предложенной схемы оптического плазмонно-резонансного биосенсора, выполненного на основе дифракционной решетки трапецеидальной формы из поликарбоната с поверхностным слоем золота. Решетка размещена в транспортном канале, через который пропускается исследуемый биомолекулярный раствор. Сенсор содержит лазер для подачи оптического излучения на решетку и ПЗС-камеру для регистрации отраженного от решетки оптического излучения. Дифракционная решетка обеспечивает на рабочей длине волны возбуждение поверхностных плазмонов.

Зависимость изменения угла возбуждения волны поверхностных плазмон-поляритонов от вариации показателя преломления смежной с поверхностью решетки среды в диапазоне 1,33-1,37 является линейной. Чувствительность при регистрации углового смещения минимума коэффициента отражения составляет 72 градуса на единицу показателя преломления. Минимальное изменение показателя преломления покровного слоя, которое может быть определено по смещению минимума коэффициента отражения, в предположении, что фотоприемная камера сенсора имеет возможность регистрации излучения с угловым разрешением $1 \cdot 10^{-4}$ градусов, составляет $5 \cdot 10^{-5}$. Расчет дифракционной эффективности отражения от решетки ТМ-поляризованного излучения проведен методом связанных волн (RCWA), параметры решетки измерялись с помощью сканирующего туннельного микроскопа, оптическая схема макета сенсора была собрана на основе гониометрической установки. Результаты теоретических и экспериментальных исследований условий возбуждения поверхностных плазмонов согласуются между собой с точностью 5%.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы, которые состоят в следующем:

1. Предложен новый метод построения интегрально-оптических пространственных разделителей поляризации и новый метод построения ТЕ- и ТМ-поляризаторов, использующие высокое модовое двулучепреломление пассивных волноводных структур на основе четырехслойных волноводов из изотропных диэлектрических слоев. Значительное модовое двулучепреломление сформировано за счет использования слабонаправляющих волноводов в подложках из стекла с высокопреломляющей наноразмерной диэлектрической пленкой. На основе предложенных методов разработаны волноводные разделители поляризаций и поляризаторы с расчетной эффективностью развязки свыше 25 дБ. Построены физико-математические модели их функционирования. Изготовлены эффективные ТЕ- и ТМ-поляризаторы с коэффициентом развязки между поляризационными компонентами излучения 15–25 дБ.

2. Впервые предложен новый метод создания пассивных преобразователей поляризации оптического излучения на основе слабонаправляющего четырех-

слоистой волноводной структуры из диэлектрических изотропных слоев, использующий либо биения его мод, либо их эволюцию. Определены условия и закономерности гибридизации мод, построена физико-математическая модель функционирования преобразователя поляризаций, подтвержденная экспериментально. Изготовлены лабораторные макеты прототипов преобразователей поляризации с эффективностью преобразования 95%.

3. Предложен способ пассивного преобразования линейной плоскости поляризации излучения в циркулярную, использующий частично заглубленный ионообменный волновод в стекле асимметричной формы. Расчетные значения угла поворота поляризации составляют $-42,4^\circ$ и $47,6^\circ$ при входном ТЕ- и ТМ-поляризованном излучении, соответственно.

4. Предложена и теоретически обоснована новая схема заграждающего оптического фильтра на основе четырехслойного диэлектрического волновода из изотропных слоев, использующая особенности его дисперсионной характеристики и специфику спектральных зависимостей условий отсечки мод, для работы с эрбиевыми волноводными усилителями оптического излучения.

5. Построена физико-математическая модель и произведен расчет функционирования оптического волноводного разделителя поляризаций адиабатического типа с применением ионообменного волноводного Y-разветвителя, покрытого тонким слоем металла, который представляет из себя плазмонный оптический волновод. Эффективность развязки между каналами составляет 14 дБ для ТЕ-волн и 16 дБ для ТМ-волн. Общие потери разделителя поляризаций с применением плазмонного волновода составляют не более 2,5 дБ для ТМ-волн и 0,5 дБ для ТЕ-волн, общая длина устройства составляет 3 мм.

6. Построена трехмерная физико-математическая модель технологического процесса создания интегрально-оптических схем сложных конфигураций в стеклянных подложках методом многоступенчатого электростимулированного ионного обмена $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ и $K^+ \leftrightarrow Na^+$, полученная на основе совместного численного решения нелинейного двумерного уравнения диффузии и уравнения электростатики, в том числе для случаев большого различия подвижностей ионов, принимающих участие в обмене, а также для двухслойных и частично-заглубленных волноводных конфигураций и волноводов с варьируемым уровнем заглубления. Уравнение диффузии решено путем конечно-разностной дискретизации по схеме Кранка-Николсона с последующим решением системы нелинейных уравнений. Для практического использования данной модели проведено определение приращения показателя преломления, коэффициента самодиффузии и отношения подвижностей ионов путем применения специальной методики реконструкции на основе симплекс-метода многомерной оптимизации Нелдера-Милда, не предполагающей какой-либо информации о виде распределения профиля показателя преломления изготовленных планарных оптических волноводов. Построенная модель формирования микроструктур с известным концентрационным профилем, в сочетании с методиками расчета волноводных оптических схем, в частности, в комбинации с трехмерным методом распространяющегося пучка и методами расчета модовой структуры, была использована для планирования параметров технологического процесса и оптимизации волноводных топологий базовых пассивных волоконно-совместимых одномодовых компонентов: прямых каналов, S-изгибов различных функциональных форм и Y-разветвителей на их основе, направленных ответвителей, интерферометров Маха-Цендера (на основе направленных ответвителей и на основе Y-разветвителей) с рабочими длинами волн

0,63/0,85/1,3/1,55 мкм путем ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ и $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ (многоступенчатого в последнем случае). Указанные компоненты, ориентированные на использование для использования в телекоммуникационных и сенсорных устройствах, были созданы с прогнозируемыми оптико-физическими характеристиками.

7. Исследован эффект когерентной связи направленных и радиационных мод в Y-разветвителях на основе S-изгибов и прямолинейных каналов для создания и оптимизации широкополосных многоканальных волноводных распределителей оптического излучения, формируемых на основе ионообменных заглубленных волноводов в стекле. Установлена степень влияния когерентной связи на неравномерность коэффициента деления разветвителей древовидной структуры с учетом длины связующих каскады разветвителя волноводных сегментов, а также от уровня децентрирования входного волоконного световода. Приемлемая равномерность деления достигается при длине этих сегментов порядка единиц миллиметров. С учетом данного эффекта и особенностей дисперсионной характеристики волноводов разработаны и методом многоступенчатого ионного обмена в подложках из стекла К-8 изготовлены волоконно-совместимые одномодовые разветвители с рабочим диапазоном длин волн 1,3–1,6 мкм.

8. Проведено теоретическое исследование эффекта направленной связи в асимметричных волноводных ионообменных структурах с целью создания широкополосных (1,5–1,6 мкм) направленных ответвителей в стекле для построения распределителей оптического излучения $2 \times N$. Выработан алгоритм выбора оптимальных параметров таких ответвителей.

9. Произведен расчет оптимальной волноводной топологии спектрального оптического демультиплексора 1×4 с шагом 20 нм (в диапазоне 1,5–1,6 мкм) на основе интерферометра Маха-Цендера с применением направленных ответвителей, с расчетным коэффициентом развязки 24 дБ. Мультиплексор основан на заглубленных ионообменных волноводах в стекле.

10. На основе результатов исследования эффекта мультиплицирования изображений входного источника оптического сигнала и разделения оптического излучения за счет интерференции волноводных мод в квазипланирном слабонаправляющем многомодовом ионообменном волноводе в стекле. Разработаны проекты оптимальной волноводной топологии интегрально-оптических разветвителей 1×3 и 1×5 . Расчетное значение вносимых потерь разветвителя – 0,6 дБ. Продольная длина S-изгибов для разветвителя 1×5 составила 6,5 мм для разнесения всех выходных каналов на 250 мкм между собой. Длина всего устройства – 9,3 мм. Разработан проект оптимальной волноводной топологии интегрально-оптического мультиплексора волноводных мод TE_0 и TE_1 на основе асимметричного Y-разветвителя, формируемого в подложках из стекла по методу ионного обмена.

11. Проведен подробный анализ стандартных и модифицированных интерферометрических, поляриметрических и плазмонно-резонансных схем построения сенсоров химико-биологических реагентов с применением ионообменных волноводных схем в стекле, как единой платформы для построения различных устройств. Рассмотрены физические и схемотехнические аспекты построения сенсорных устройств с оптимальной топологией. Установлено, что зависимость чувствительности волновода сенсора от эффективной глубины канального волновода имеет выраженный максимум, а зависимость эффективного показателя преломления моды канального волновода от показателя преломления покровной среды в

диапазоне показателя преломления водных растворов имеет линейный характер. Произведена теоретическая оценка предельной чувствительности различных сенсоров и оценены пути ее повышения путем добавления тонкого диэлектрического высокопреломляющего слоя с показателем преломления 2,2–2,4. Установлено, что, существует максимальное значение чувствительности, соответствующее определенной толщине пленки. Применение высокопреломляющей пленки ($n=2,2-2,4$), наносимой на волновод, приводит к значительному увеличению его чувствительности – в 400–500 раз, по сравнению с чувствительностью ионообменного волновода без пленки.

12. На основе предложенного принципа разделения поляризаций в четырехслойном волноводе и метода увеличения чувствительности за счет нанесения дополнительного высокопреломляющего слоя к базовой волноводной структуре разработана оптическая схема высокочувствительного оптического сенсора-рефрактометра поляриметрического типа. Произведена теоретическая оценка его разрешающей способности при измерении изменений показателя преломления покровной среды, которая составляет $1 \cdot 10^{-8}$, это соответствует регистрируемому сдвигу фаз ортогональных мод $5,5 \cdot 10^{-4}$ радиан при длине всего устройства 30 мм.

13. Теоретически (строгим методом связанных волн) и экспериментально исследована простая схема прототипа оптического плазмонно-резонансного биосенсора, выполненного на основе металлодиэлектрической дифракционной решетки трапецеидальной формы. Минимальное изменение показателя преломления исследуемой среды, которые может быть зарегистрировано, в предположении, что фотометрия проводится с угловым разрешением $1 \cdot 10^{-4}$ градусов, составляет $5 \cdot 10^{-5}$.

14. Разработаны и сформированы матрицы дальнефокусных микролинз для датчиков волнового фронта Шака-Гартмана методом электростимулированной миграции ионов серебра в стеклянных подложках. Матрицы обладают высокой плотностью упаковки, имеют размерность 200×267 с шагом 150 мкм, фокусным расстоянием 4,5 мм и диаметром фокального пятна 49 мкм. Собранный датчик волнового фронта Шака-Гартмана на основе изготовленной матрицы микролинз при применении 8-битового ПЗС сенсора с размером пикселя 3 мкм позволил измерять искажения волнового фронта в динамическом диапазоне 14 мрад и с чувствительностью 2 мкрад

15. Проведено исследование волноводных конфигураций (прямых и изогнутых канальных волноводов, направленных ответвителей, Y- и T-разветвителей) на основе щелевых плазмонных металлодиэлектрических волноводов с шириной канала 100 нм. Применялись конечно-разностные и конечно-элементные методы решения векторного волнового уравнения и уравнений Максвелла с учетом модели дисперсии Друде. Потери энергии фундаментальной плазмонной моды составляют не более 0,7 дБ/мкм, дополнительные потери за счет изменения направления распространения не превышают 0,5 дБ (длина волны 1,55 мкм).

16. Разработан комплекс программных средств для полного векторного расчета и анализа поляризационных элементов интегральной оптики и микрооптики в стекле, а также волноводной плазмонной нанооптики методами распространяющегося пучка, модового разложения, строгим методом связанных волн, методом прямой конечно-разностной пространственно-временной дискретизации уравнений Максвелла и рядом других методик. Расчет и оптимизация волноводных схем в стекле основаны на совместном применении указанных программных средств в

сочетании с программными кодами, моделирующими формирование элементов интегральной оптики многоэтапными методами ионного обмена и электростимулированной миграции ионов.

Список цитируемой литературы

1. Martínez-Duart J.M. Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics / R.J. Martín-Palma, F. Agulló-Rueda, F. Agulló-Rueda, – Elsevier Science, 2006. – 304 p.
2. Чеботарев, С. Н. Наноструктуры AIVB IV и АПВ V для устройств оптоэлектроники: монография / С. Н. Чеботарев, М. Л. Лунина, Д. Л. Алфимова. – Ростов н/Д: изд-во ЮНЦ РАН, 2014. – 275 с.
3. Reed, G.T. Silicon Photonics: The State of the Art / G.T. Reed. – Blackwell: Wiley-Interscience, 2008.
4. Korkishko, Yu.N., Ion exchange in single crystals for integrated optics and optoelectronics / Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov – Cambridge International Science Publishing, Cambridge, UK, 1999.
5. Гладкий, В.П. Элементы волноводной оптоэлектроники для устройств функциональной обработки цифровой информации / В.П. Гладкий, В.А. Никитин, В.П. Прохоров, Н.А. Яковенко // Квантовая электроника. – 1995. – Т.22. – №10. – С.1027-1033.
6. Tervonen, A. Ion-exchanged glass waveguide technology: a review / A. Tervonen, R.W. Brian, S. Honkanen // Optical Engineering. 2011. – V.50. – N7. – P. 071107-1 – 071107-15.
7. Демичев, И.А. Формирование люминесцентных оптических волноводов в силикатном стекле при вводе ионов меди методом ионного обмена / И.А. Демичев, А.И. Сидоров, Н.В. Никаноров, Т.А. Шахвердов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. – Т.15. – №1. С.54–59.
8. Никаноров, Н.В. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) / Н.В. Никаноров, Г.Т. Петровский // Физика и химия стекла. – 1999. Т.25. – №1. – С.21-69.
9. Tagantsev D.K. Phosphate glasses for GRIN structures by ion exchange / D.K. Tagantsev, B.V. Tatarintsev, A.A. Lipovskii, P.C. Schultz // Journal of Non-Crystalline Solids. 2008. – Vol.354. №12–13. P.1142-1145.
10. Kaganovskii, Yu. Formation of nanoclusters through silver reduction in glasses: the model / Yu. Kaganovskii, A. Lipovskii, M. Rosenbluh, V. Zhurikhina // Journal of NonCrystalline Solids. – 2007. – V.353. – P.2263–2271.
11. Карапетян, Г.О. Влияние диффузионной нелинейности на характеристики градиентных дифракционных структур, формируемых в стеклах ионным обменом / В.В. Журихина, А.А. Липовский, Д.К. Таганцев, Б.В. Татаринцев // Физика и химия стекла. - 2000. - Т.26, №2. - С. 179-186.
12. Никитин, А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике / В. А.Никитин, Н.А. Яковенко // Краснодар, 2010. – 154 с.
13. Bogdanov, S. Material platforms for integrated quantum photonics / S. Bogdanov, M.Y. Shalaginov, A. Boltasseva, V. M. Shalaev // Optical Materials Express. – 2017. – N2. – P. 111-132.

14. Lüsse, P. Analysis of vectorial mode fields in optical waveguides by a new finite difference method / P. Lüsse, P. Stuwe, J. Schüle, H.G Unger // *J. Lightwave Technology*. – 994. – V.12. – P.87–494.
15. Воеводин, А.А. О возможности создания новых интегрально-оптических поляризаторов и преобразователей волноводных мод / А.А. Воеводин, В.П. Гладкий, И.А. Прохорова, Н.А. Яковенко // *Письма в ЖТФ*. – 1990. – Т. 16. – Вып. 24. – С. 73-77.
16. Jordana, E. Design of a waveguide with optics axes tilted by 45° and realized by ion-exchange on glass / E. Jordana, E. Ghibaudoa, A. Boucharda, Blanc- M.-F. Jambon, F. Royerb, J.-E Broquin. // *Proc. of SPIE*. – 2016. – V.9750. – Paper 975009.
17. Huang, W.P. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method / W.P. Huang, C.L. Xu // *IEEE J. Quant. Electron.* – 1993. – V.29. – N10. – P.2639-2649.
18. Burns, W.K. Mode conversion in planar dielectric separating waveguides / W.K. Burns, A.F. Milton // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1975. – V.11. – N1. – P.32-39.
19. Hsing, C.C. Simulation of tapered transitions in ion-exchanged channel waveguides / C.C. Hsing, R.V. Ramaswamy // *Applied Optics*, 1990. – V.29. – N8. – P. 1150-1156.
20. Weiss, M.N. Determination of ion-exchanged channel waveguide profile parameters by mode-index measurements / M.N. Weiss, R. Srivastava // *Applied Optics*. – 1995. – V.34. – N3. – P.455-458.
21. Yap, D. Coupling between successive Ti:LiNbO₃ waveguide bends and branches / D. Yap, M. Johnson // *Appl. Opt.* – 1984. – V.23. – N17. – P.2991-2998.
22. Akagi, A. Wavelength characteristics of (2x2) optical channel-type directional couplers with symmetric or nonsymmetric coupling structures / A. Akagi, K. Jinguji, M. Kawachi // *Journal of Lightwave Technology*. – 1992. – V.10. – N6, – P. 735-746.

Основные публикации по теме диссертации

Монография

Векшин М.М. Поляризационные элементы и устройства интегральной оптики: монография / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко, // издательство КубГУ, Краснодар, 2017. – 240 с., ISBN 978-5-8209-1343-3.

Публикации в журналах перечня ВАК, Scopus, Web of Science

1. Vekshin M. M. Polarization conversion by transformation of the TM₀–TE₁ modes in an ion-exchange glass waveguide / M. M. Vekshin, N. A. Yakovenko // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Allerton Press, Inc.)*. – 2019. – Vol. 55. – №1. – P. 41–44

Векшин, М.М. Преобразование поляризации путём конверсии мод TM₀–TE₁ в ионообменном стеклянном волноводе / М. М. Векшин, Н.А. Яковенко / *Автоматрия*. – 2019. – №1. – С.51-55.

2. Кулиш, О.А. Интегрально-оптический преобразователь поляризации излучения на основе асимметричного волновода в стекле / О.А. Кулиш, М.М. Векшин // *Нано- и микросистемная техника*. – 2017. – Т.19. – №11, С.643-648.
3. Векшин, М.М. Расчет эффективности ввода оптического излучения DFB- и VCSEL- лазеров в стеклянный интегрально-оптический волновод / М.М. Векшин, Н.Д. Никифоров // *Инженерный вестник Дона*, 2017. – №3.
4. Векшин, М.М. Синтез оптических волноводов со сложной формой поперечного сечения и 3D волноводных структур в стекле / М.М. Векшин, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2017. – №3. – С. 60-66.
5. Векшин, М.М. Эволюционное преобразование поляризации оптического излучения на основе слабнонаправляющих волноводов в стекле / М.М. Векшин, В.А. Никитин // *Инженерный вестник Дона*, 2017. – №4.
6. Векшин М.М. Моделирование двухэтапного процесса формирования оптических волноводов в стекле К-8 методом электростимулированной миграции ионов / М.М. Векшин, В.А. Никитин // *Наука Кубани*. – 2017. – № 1. – С. 40-45.
7. Векшин М.М. Физико-математическое моделирование многоэтапных процессов формирования одномодовых интегрально-оптических волноводов в стекле К-8 методом ионного обмена / М.М. Векшин, В.А. Никитин // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – №4. – С.1-14.
8. Vekshin, M.M. Creating microlens arrays in K8 glass for waveront sensors / A.S. Levchenko, V.A. Nikitin, N.A. Yakovenko // *Journal of Optical Technology*. – 2013. – V.80. – №10. – P.601-603.
- Векшин, М.М. Создание матриц микролинз в стекле К8 для датчиков волнового фронта / Векшин М.М., Левченко А.С., Никитин В.А., Яковенко Н.А // *Оптический журнал*. – 2013. – Т.80. – №10. – С. 24-27.
9. Векшин, М.М. Преобразование поляризации в слабнонаправляющем оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. – №11. – С.14-18.
10. Векшин, М.М. Полосно-заграждающий фильтр на основе четырехслойного оптического волновода / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – №9. – С.50-54.
11. Исследование плазмонной дифракционной наноструктуры для биосенсоров / М.М. Векшин., О.А. Кулиш, А.Г. Савченко, Н.А. Яковенко // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. (Естественные науки)*. – 2013. – №1. – С.36-39.
12. Селина, Н.В. Аналитическое решение задачи о распределении электромагнитных полей в микрополосковом плазмонном волноводе Н.В. Селина, М.М. Векшин, Е.Н. Тумаев, Н.А. Яковенко, М.А. Благодарь // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. – 2013. – №2. – С. 95-100.
13. Векшин, М.М. Адиабатические интегрально-оптические разделители ТЕ/ТМ-волн / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // *Известия Южного федерального университета (ЮФУ). Технические науки*. – 2012. – Т.132. – №7. С. 193-200.
14. Векшин, М.М. Расчет прохождения импульсного сигнала по изогнутым оптическим волноводным структурам / М.М. Векшин, О.А. Кулиш / *Известия Южного федерального университета (ЮФУ). Технические науки*. 2012. – Т.132. – №7. – С. 220-226.

15. Векшин, М.М. Исследования элементов волноводной плазмонной нано-оптики / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // Научно-образовательный и прикладной журнал «Экологический вестник научных центров Черноморского Экологического Сотрудничества» Краснодар, КубГУ. – 2012. – №4. – С.33-36.

16. Vekshin, M.M. Glass microlens arrays for Shack–Hartmann wavefront sensors / М.М. Vekshin, A.S. Levchenko, A.V. Nikitin, V.A. Nikitin, N.A. Yakovenko // Measurement Science and Technology. 2010. – V.21. – N5. – Paper 054010.

17. Vekshin, M. M. Integrated optical components in glass for sensory microsystems / М.М. Vekshin, E.B. Khotnyanskaya, V.A. Nikitin, N.A. Yakovenko // Measurement Techniques (Springer - New York). – 2010. – V.53. – N3. – P. 342-346.

Векшин, М.М. Интегрально-оптические компоненты в стекле для сенсорных микросистем М.М. Векшин, Е.Б. Хотнянская, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // Измерительная техника. – 2010. №3. – С.65-68.

18. Селина, Н.В. Аналитический подход к расчету электромагнитного поля в системе металл-диэлектрик-металл / Н.В. Селина, М.М. Векшин, Е.Н. Тумаев, Н.А. Яковенко // Научно-образовательный и прикладной журнал «Экологический вестник научных центров Черноморского Экологического Сотрудничества» Краснодар, КубГУ. – 2010 – №3.

19. Vekshin, M.M. Design and study of a multichannel microlens integrated-optic coupler / М.М. Vekshin, V.A. Nikitin, A.V. Nikitin, N.A. Yakovenko // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Allerton Press, Inc.). – 2009. – Vol.45. – №1. – P.70-74.

Векшин, М.М. Разработка и исследование многоканального микролинзового интегрально-оптического ответвителя излучения / М.М. Векшин., А.В. Никитин, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // Автометрия. – 2009. – Т.45. – С.102-108.

20. Векшин, М.М. Получение и исследование матриц микролинз с плотной упаковкой / М.М. Векшин., А.В. Никитин, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // Известия Вузов. Северо-Кавказский Регион. Естественные науки, 2009. – №1. – С.41-44.

21. Векшин, М.М. Характеристики плазмонно-резонансных биосенсоров на основе субмикронных дифракционных решеток / М.М. Векшин, Н.А. Яковенко // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – №1. – С.65-69.

22. Векшин, М.М. Расчет базовых элементов плазмонной интегральной нанооптики / М.М. Векшин, Н.А. Яковенко // Научно-образовательный и прикладной журнал «Экологический вестник научных центров Черноморского Экологического Сотрудничества» Краснодар, КубГУ. – 2007. – №4. – С.63-69.

23. Бондаренко, С.Г. Исследование интегрально-оптического интерферометра Маха-Цендера на основе направленных ответвителей в качестве биосенсора / С.Г. Бондаренко, М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №2. С.68-70.

24. Бондаренко, С.Г. Расчет поляризационных характеристик интегрально-оптических волноводов / С.Г. Бондаренко, М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Е.Б. Хотнянская, Н.А. Яковенко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2005. – №2.

25. Векшин М.М. Пространственное разделение ТЕ- и ТМ-волн на основе диэлектрических изотропных слоев / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А. Яковенко // Автометрия. – 2004. – Т.40. – №4. – С.50-56.

26. Бондаренко, С.Г. Пространственный оптический разделитель ТЕ- и ТМ-волн на основе металлодиэлектрического двухлучевого волноводного интерфе-

рометра / С.Г. Бондаренко, М.М. Векшин, О.А.Кулиш, Н.А Яковенко // Микро-системная техника. – 2004. – №12. – С. 31-34.

27. Векшин, М.М. Разработка и моделирование микроволноводного оптического интерферометра Юнга для сенсорных систем / М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Е.Б Хотнянская, Н.А Яковенко // Научно-образовательный и прикладной журнал «Экологический вестник научных центров Черноморского Экологического Сотрудничества» Краснодар, КубГУ. – 2004. – № 4.

28. Векшин, М.М. Волноводный поляризационный рефрактометр / М.М. Векшин, В.А. Никитин, Е.Б Хотнянская, Н.А Яковенко // Микро-системная техника. – 2003. – №7.

29. Векшин, М.М. Оптические модуляторы на основе сегментированных интегрально-оптических волноводов / М.М. Векшин, В.П. Гладкий, Н.А. Яковенко // Радиотехника. – 2003. – №6. – С.33-37.

30. Векшин, М.М. Интегрально-оптический рефрактометр на основе канального металлодиэлектрического волновода: трехмерное моделирование // М.М. Векшин, О.А. Кулиш, Н.А Яковенко // Научно-образовательный и прикладной журнал «Экологический вестник научных центров Черноморского Экологического Сотрудничества» Краснодар, КубГУ. – 2003. – №1.

31. Векшин, М.М. Интегрально-оптический поляризационный рефрактометр. / М.М. Векшин, Е.Б. Хотнянская, Н.А. Яковенко // Известия Вузов, Электроника. – 2003. – №3. – С. 91-92.

32. Vekshin M.M. Integrated-optics refractometer on channel metal-clad waveguides on channel metal-clad waveguides: three-dimensional simulation and sensitivity considerations / М. М. Vekshin, О.А. Culish, Н.А. Yacovenko // Proceedings of SPIE. – 2002. – V.4900. – P. 447-450.

33. Векшин, М.М. Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных диэлектрических волноводов / М.М. Векшин, В.П. Гладкий, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // Автометрия. – 1998. – №5. – С.58-65.

34. Векшин, М.М. Поляризационные свойства четырехслойного диэлектрического волновода / М.М. Векшин, В.А. Никитин, Н.А. Яковенко // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т.24. – №6. – С.35-39.

Патенты

1. Пат. 2312833 Российской Федерации, МПК⁷ С03С 21/00, G02В 3/06. Способ изготовления интегральных микролинз; Яковенко Н.А., Никитин В.А, Векшин М.М., Никитин А.В. - № 2005138606/03; заявл.12.12.2005; опубл.20.12.2007, Бюл.№35.

2. Пат. 80637 Российской Федерации МПК⁷ Н04В 9/00 Интегрально-оптический коммутатор для систем квантовой криптографии с фазовым кодированием; Векшин М.М., Кулиш О.А. - № 2008140713, заявл. 14.10.2008; опубл 10.02.09.

3. Пат. № 92205 Российской Федерации МПК⁷ Н04В 9/00 Интегрально-оптический поляризационный разветвитель; Векшин М.М., Кулиш О.А. – № 2009141819, заявл. 12.11.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.

4. Пат. 100638 Российской Федерации МПК⁷ G02В 6/122 Интегрально-оптический матричный делитель излучения; Векшин М.М., Никитин В.А., Романов А.А., Яковенко Н.А. - № 2010135561/28, заявл. 24.08.2010; опубл. 20.12.2010.

5. Пат. № 2461921 Российская федерации МПК⁷ H 01 P 1/00 Интегрально-оптический пространственный разделитель поляризации на основе асимметричного Y-разветвителя; Векшин М.М., Кулиш О.А., заявл. 10.03.11; опубл. 20.09.12., Бюл. № 26.

6. Пат. 127209 Российской Федерации МПК⁷ G02F 1/00 “Оптический плазмонно-резонансный биосенсор”, Векшин М.М., Яковенко Н.А., Соколов И.И. , заявлено 30.03.2012, опубл. 20.04.2013., Бюл. № 11.

7. Пат. 2524460 Российской Федерации МПК⁷ G02B6/13 “Способ изготовления интегрально-оптической схемы в стеклянной подложке с рупорообразным элементом”, Никитин В.А., Векшин М.М., Яковенко Н.А., заявлено 14.02.13; опубл. 27.07.14.

8. Пат. 2682070 Российской Федерации МПК G 02 F 1/01 “Интегрально-оптический преобразователь поляризации излучения на основе асимметричного волновода в стекле”, Векшин М.М., Кулиш О.А., заявл.9.01.18, опубл. 11.03.19.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Векшин, М.М. Полный векторный расчет модовой структуры интегрально-оптических волноводов общего вида / М.М Векшин, О.А. Кулиш // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615163, заявл. 22.04.2013; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.05.2013.

2. Векшин, М.М. Расчет характеристик интегрально-оптических элементов для систем квантовой криптографии / М.М Векшин, О.А. Кулиш // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614531, заявл. 19.12.2011; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.05.2012.

3. Векшин, М.М. Расчет оптических характеристик дифракционных наноструктур / М.М. Векшин, А.Г. Савченко // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615004 , заявл. 26.04.2011; зарегистрировано 21.06.2011.

4. Векшин, М.М. Программный комплекс расчета оптических характеристик и оптимальной топологии интегрально-оптических схем в стекле / М.М. Векшин, О.А. Кулиш // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617766 , заявл. 9.08.2011; зарегистрировано 5.10.2011.

Автор выражает большую признательность научному консультанту, д.т.н., профессору, действительному члену Академии инженерных наук РФ Яковенко Н.А. за помощь в работе и обсуждению полученных результатов на всех ее этапах. Автор также выражает благодарность профессору кафедры оптоэлектроники КубГУ Никитину В.А. за большую помощь в технологической части работы по формированию интегрально-оптических схем.

Векшин Михаил Михайлович
Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов
микро- и нанофотоники

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук.

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография Кубанского государственного университета