

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по инновационной  
деятельности ФГБОУ ВО

«Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова»,

доктор технических наук, доцент

Кравченко Олег Александрович



«09» сентября 2019 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»  
о диссертационной работе Векшина Михаила Михайловича на тему  
«Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов  
микро- и нанопотоники», представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика»

**Актуальность темы диссертационной работы**

Развитие исследований закономерностей распространения оптического излучения в слоистых направляющих средах, в том числе поляризационных эффектов потенциально может привести к созданию принципиально новых методик оптической обработки информации. Создание интегрально-оптических поляризационных и 3D схем новых поколений, в том числе для задач квантовой фотоники и криптографии, имеет большие перспективы развития, обусловленные свойствами 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, большинство таких схем обладают поляризационно-зависимыми свойствами, а, во-вторых, 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. Известные подходы к построению поляризационных волноводных схем приводят к созданию последних с целым рядом недостатков и ограничений, связанных с малым рабочим спек-тральным диапазоном, очень жесткими допусками на технологические параметры, плохой совместимостью с волоконными световодами, и целым рядом других.

В связи с этим диссертационное исследование Векшина М.М., посвященное решению фундаментальных задач и преодолению ограничений существующих базовых подходов к построению оптических волноводных поляризационных элементов и созданию новых оптико-физических подходов и физико-технологических принципов построения поляризационных схем интегральной оптики на базе перспективных технологий формирования интегрально-оптических элементов, является несомненно актуальной. Отметим, что выбранная диссертантом тема представляет интерес не только для специалистов в области интегральной оптики, но и для исследователей смежных направлений: волоконной оптики, нано- и микроволновой фотоники, наноплазмоники и оптоэлектроники.

**Новизна исследования, полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, состоит в:**

- определении поляризационных характеристик асимметричного ионообменного селективно заглубленного волновода с различными диэлектрическими покровными слоями и построении модели 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;

- разработке физико-математической модели технологического цикла формирования компонентной базы одномодовых интегрально-оптических схем в силикатных стеклах методами многоэтапного бинарного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов 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;

- установлении оптических свойств поверхностных плазмонов в микрополосковых и щелевых волноводных схемах и дифракционных наноструктурах, которые могут быть использованы при разработке 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 трапецеидальной формы, а также с целью оценки потерь оптической энергии ТМ-волн в нановолноводных схемах на основе щелевых волноводов;

- изготовлении методом электростимулированной миграции ионов дальнефокусных матриц микролинз с высоким коэффициентом заполнения, использованные в сенсорах волнового фронта Шака-Гартмана;

- установлении 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;

- выявлении оптимальных характеристик оптической схемы волнового мультиплексора  $1 \times 4$  со спектральным интервалом между каналами 20 нм на основе каскадов неравноплечных интерферометров Маха-Цендера в стекле, а также определены допуски на технологические параметры формируемых схем.

**Достоверность полученных результатов** определяется использованием современного оборудования, комплекса апробированных экспериментальных методов и аттестованных методик исследований с применением метрологически поверенной и сертифицированной измерительной аппаратуры, а также применением методов расчета поляризационных и дисперсионных характеристик оптических волноводных микро- и наноструктур общего вида, методов численного решения многомерных нелинейных уравнений параболического типа, описывающих электростимулированную диффузию ионов и ионный обмен в стекле. Линейно-алгебраические задачи большой размерности, возникающие в ходе применения указанных методов решались с применением метода неполной блочной факторизации. Для расчета различных схем на поверхностных плазмонах использовался строгий метод связанных волн и прямое конечно-разностное решение уравнений Максвелла в пространственно-временном масштабе. Достоверность выводов работы обусловлена согласованностью результатов теоретических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем автором и другими исследователями.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из них 6 публикаций в журналах, индексируемых в наукометрической базе Web of Science, 10 публикаций в журналах из наукометрической базы Scopus, 33 статьи в журналах из перечня ВАК. По результатам исследований получено 8 патентов РФ и 4 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ. Результаты диссертационного исследования докладывались на региональных, всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

**Научная ценность работы** состоит в установлении закономерностей гибридизации волноводных мод в слабонаправляющих многослойных

диэлектрических волноводах, развитием трехмерной физико-математической модели формирования элементов интегральной оптики в стекле сложных конфигураций методами многоэтапного ионного обмена, направленной на разработку принципов и физико-технологических основ построения компонентной базы пассивных интегрально-оптических схем для систем оптической обработки информации и сенсорных устройств. Установлены фундаментальные закономерности формирования гибридных мод в оптических волноводах на основе диэлектрических изотропных слоев, которые служат основой для создания метода преобразования плоскости поляризации направленного излучения в пассивных волноводных структурах, использующего либо эволюцию моды, либо биения мод. Разработаны методики построения преобразователей поляризации, пространственных разделителей поляризационных компонент излучения и ТЕ/ТМ-поляризаторов, а также проведены разработки иных 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.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в разработке методов построения различных волноводных поляризационных элементов, а также 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 назначения, к которым относятся:

- метод разделения поляризационных компонент канализируемого оптического излучения в пространстве и поляризационной селекции излучения, реализованные посредством интегрально-оптических структур на основе многослойных канальных волноводов из изотропных диэлектрических слоев с высоким модовым двулучепреломлением;
- метод преобразования плоскости поляризации, использующий либо эволюцию моды, либо биения мод с применением установленных в

диссертации закономерностей формирования гибридных мод в слабонаправляющем четырехслойном оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев;

- 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.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Основные научные и практические результаты рекомендуются для создания одномодовых пассивных интегрально-оптических схем в стекле и других элементов микрооптики различного функционального назначения, а также для разработки новых оптических материалов в ИОФ РАН, НИЯУ МИФИ (Москва), МГУ (Москва), Центе ВОСПИ (Москва), КТИ ИП СО РАН (г. Новосибирск), ПАО «Ростелеком», АО «ГОИ» (Санкт-Петербург), АО ФНПЦ ННИПИ «Кварц» (Нижний Новгород), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ООО НТО «ИРЭ-Полюс» (Москва), АО «ЛОМО» (Санкт-Петербург) и других научно-исследовательских и образовательных учреждениях Российской Федерации.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Во второй главе диссертации и в автореферате достаточно подробно представлены и обсуждены физические основы создания поляризаторов ТМ-типа и преобразователей поляризации, однако вопросы построения поляризаторов ТЕ-типа описаны только в диссертации, в то время как в автореферате присутствует лишь краткая характеристика функционирования таких поляризаторов и представлены результаты измерений их характеристик.

2. В работе не в полной мере представлено описание технологий создания новых поляризационных элементов интегральной оптики, а также результатов оптимизации их оптических параметров. Соискатель, вероятно, исходил из имеющейся в его распоряжении технологической базы для изготовления таких элементов и присущих этому аппаратурному оформлению ограничений.

3. Не представлено описание оптических, волноводных схем и используемых логических элементов, при этом в диссертации большое внимание уделяется перспективам построения 3D интегрально-оптических схем, включая

технологии, развиваемую соискателем, для построения современных элементов и узлов квантовой фотоники.

4. Приведенные в главе 3 математические подходы и процедуры решения нелинейного уравнения диффузии совместно с уравнением электростатики можно было представить в более сжатой форме или вынести в приложение.

Отметим, что указанные замечания не являются критическими, не снижают ценности полученных результатов и не сказываются на высоком уровне проведенных исследований.

#### **Общее заключение по диссертационной работе**

Диссертация Векшина М.М. обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе соискателя. Диссертация соответствует Паспорту специальности 01.04.05 – оптика. Наличие некорректного заимствования материала в диссертационной работе без ссылок на источники не обнаружено. Автореферат диссертации по содержанию, актуальности, степени разработанности темы исследования, цели и задачам, научной новизне и практической значимости соответствует диссертации.

По объему проведенных исследований, научной новизне, практической ценности и достоверности полученных результатов можно сказать, что диссертация «Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов микро- и нанофотоники» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее важное значение для развития интегральной оптики и нанофотоники.

Диссертация удовлетворяет критериям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Векшин Михаил Михайлович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Отзыв составлен доктором технических наук, профессором кафедры «Физика и фотоника» Серединым Борисом Михайловичем (место работы:

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. +7 (8635) 225481, email: seredinboris@gmail.com), доктором технических наук, профессором кафедры «Физика и фотоника» Поповым Виктор Павловичем (место работы: ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, тел. +7 (8635) 225481, email: porovnpri@gmail.com).

Диссертационная работа Векшина М.М. и отзыв о ней заслушаны и обсуждены на заседании кафедры «Физика и фотоника» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова «05» сентября 2019 г., протокол № 1.

Председательствующий на заседании,  
профессор кафедры «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ),  
доктор технических наук, доцент



СЕРЕДИН Борис Михайлович

Профессор кафедры «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ),  
доктор технических наук, профессор



ПОПОВ Виктор Павлович

Подписи д.т.н. Середина Б.М. и д.т.н. Попова В.П. заверяю:

Ученый секретарь  
ученого совета ЮРГПУ (НПИ)



ХОЛОДКОВА Нина Николаевна

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»,  
сайт: <https://www.npi-tu.ru>  
раб. тел. 8 (8635) 255 420