

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Векшина Михаила Михайловича

«Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов  
микро- и нанофотоники»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических  
наук по специальности 01.04.05 – Оптика

### **Актуальность темы исследования.**

Актуальность работы определяется необходимостью проведения фундаментальных и прикладных исследований в области создания новых систем оптической связи и систем оптической обработки информации, включая квантовые. Исследования в этой области направлены на разработку новых оптико-физических принципов построения различных элементов для фотонных систем различного функционального назначения.

**Главные научные результаты, полученные диссертантом можно представить следующими основными пунктами.**

1. На основе установленных автором закономерностей и особенностей формирования модовой структуры, а также условий появления гибридных мод в слабонаправляющем оптическом волноводе на основе диэлектрических изотропных слоев с резкой асимметрией профиля показателя преломления в вертикальном направлении предложен новый метод создания пассивных преобразователей поляризации оптического излучения, использующий эволюционное преобразование мод  $TM_0-TE_1$  (в одном варианте построения преобразователей) и биения гибридных мод со взаимно противоположными по направлению циркулярными поляризациями (в другом варианте их построения). Создан лабораторный макет преобразователя поляризаций с эффективностью 95%.
2. Предложен и обоснован новый метод поляризационной селекции излучения, реализуемый 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 предложенного принципа функционирования изготовлены и исследованы TE- и TM-поляризаторы с эффективностью преобразования до 25 дБ. На основе подобной волноводной конфигурации предложен и обоснован новый способ построения полосно-заградительного оптического спектрального фильтра с плоской АЧХ в диапазоне 1,5–1,6 мкм.
3. Предложены и обоснованы новые методы разделения поляризационных компонент канализируемого оптического излучения в пространстве реализуемые посредством различных интегрально-оптическим структур. Предложено 3 метода разделения поляризаций и соответствующие интегрально-оптические схемы – на основе Y-разветвителя с применением многослойных канальных волноводов из изотропных диэлектрических слоев с высоким модовым двулучепреломлением, на основе Y-разветвителя с применением ионообменного волновода в стекле с дополнительным оптическим нановолноводом, использующим распространение поверхностных плазмонов (структура диэлектрик-металл-диэлектрик), и на основе волноводного интерферометра Маха-Цендера в стеклянном волноводе с дополнительными диэлектрическим и металлическим слоем в одном из плеч, также с использованием свойств поверхностных плазмонов.
4. Предложен и обоснован новый метод преобразования линейной плоскости поляризации излучения в круговую с применением слабонаправляющего оптического волновода в стекле с асимметричной формой канала в своем поперечном сечении, основанный на

принципе модовой эволюции. Построена модель функционирования такого преобразователя.

5. Построена трехмерная физико-математическая модель формирования волноводных элементов интегральной оптики в подложках оптического стекла методами бинарного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов на основе совместных решений нелинейных уравнений диффузии и уравнения электростатики. Модель в сочетании с методами расчета волноводных структур применена для разработки и изготовления как предложенных автором новых поляризационных схем, так и для практического создания основных волноводных элементов интегральной оптики (Y-разветвителей, элементов направленной связи, интерферометров и т.п.), в том числе для рабочей длины 1,55 мкм. Проведены расчеты более сложных конфигураций – двухслойных волноводных схем, с переменным уровнем заглубления и ряд других, предназначенных для применения, в частности, в 3D интегрально-оптических схемах квантовой фотоники.

6. Проведен комплекс исследований по построению интегрально-оптических схем для систем связи и сенсорных устройств на базе ионнообменных волноводных структур, в рамках которых проведены исследования эффекта когерентного взаимодействия направленных и излучательных мод, исследования дисперсионных и поляризационных характеристик волноводов, особенностей структуры модовых полей для сенсорных элементов, использующих затухающее поле моды. На основе полученных результатов проведен ряд разработок: многоканальных разветвителей оптического излучения древовидной топологии и на основе межмодовой интерференции, волновых и модовых мультиплексоров, нескольких схем оптических волноводных сенсоров.

7. Автором представлены результаты исследования оптических свойств специальных волноводных конфигураций с использованием поверхностных плазмон-поляритонов, и дифракционной металлодиэлектрической наноструктуры, ориентированные на создание пространственных разделителей поляризации, оптических сенсоров, щелевых и микрополосковых плазмонных нановолноводных схем.

8. Создан комплекс программных средств для расчета элементов интегральной оптики общего вида и микрооптики в стекле, и волноводной плазмонной нанооптики.

#### **Новизна научных результатов и выводов.**

Автором проведен систематизированный обзор известных научных работ по теме исследования в области интегральной оптики и нанооптики поверхностных плазмонов за достаточно длительный период времени – более 30 лет. В ходе решения задач работы получены новые результаты, сообразно поставленной цели и с учетом результатов, полученных ранее другими авторами.

Разработаны новые методы построения поляризационных преобразователей, пространственных разделителей поляризации и поляризаторов. Построены соответствующие физико-математические модели функционирования волноводных элементов, созданных в соответствии с предложенными методами. Данные элементы изготовлены и исследованы, их оптические свойства подтверждают предложенные методы.

В случае представленной разработки нового волноводного оптического преобразователя поляризаций следует, на мой взгляд, интересный вывод, что оптические свойства нанобъекта (субмикронного оптического волновода) “передаются” микрообъекту (оптическому волноводу размерами порядка единиц микрон), в состав которого он входит. Автор в работе определил, среди прочих, и эту закономерность и исследовал границы ее существования

Как основу для создания указанных оптических элементов предлагается использовать ионообменные слабонаправляющие волноводы в стеклянных подложках с дополнительными тонкопленочными слоями определенной трехмерной конфигурации. Однако вопросы формирования волноводных структур в стекле поднимаются не только

для этих целей, но на более глубоком уровне построения общей физико-математической модели для оценки возможностей технологии ионного обмена, электростимулированной миграции ионов, их разновидностей и многоэтапных комбинаций для построения схем различной геометрии и различного назначения. К моему сведению, работы в этой области ранее касались по большей части материаловедческих аспектов формирования градиентных волноводов и отдельных элементов микрооптики, таких, как фазовые дифракционные решетки.

Автор увязывает весь комплекс вопросов, возникающих при изготовлении трехмерной интегрально-оптической схемы, в единое целое. Построенная модель формирования микроструктуры связывается с ее оптическими свойствами, которые зависят как от материальных параметров, так и от пространственной топологии, включая достаточно сложные топологии, с необходимостью учета, к примеру, связи собственных и излучательных мод и т.д. Нужно отметить высокую общность такого подхода и применяемых в нем методов для построения базовых элементов современной интегральной оптики, включая поляризационные элементы.

**Переходя к общей характеристике работы,** считаю, что она представляет завершенное научное исследование, в котором рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с задачами и проблемами построения поляризационных элементов и устройств интегральной оптики, а также создания единой технологической современной базы как для изготовления как указанных элементов, так и других компонент интегрально-оптических схем, востребованных в различных задачах фотоники.

Цель и задачи исследования сформулированы четко. Структура работы логична и обоснована. Материал излагается последовательно и имеет достаточное для понимания количество иллюстраций.

В работе пройден большой и сложный путь от разработки исходных методик преобразования, разделения поляризаций и поляризационной фильтрации до практического создания и исследования законченных поляризационных элементов. Для выработки указанных методик автор в ходе проведенных исследований установил закономерности и особенности формирования модовой структуры, модового двулучепреломления и дисперсионных свойств ряда специфических волноводных конфигураций.

В частности, стоит выделить, как важное достижение, доказанную и экспериментально проверенную возможность построения пассивного конвертора поляризаций путем преобразования мод  $TM_0 - TE_1$  на основе слабонаправляющего волновода в стеклянной подложке, причем асимметрии сердцевины волновода, которая технологически сложно реализуется для данных задач, либо анизотропии материала слоев для построения такого конвертора не требуется. Также стоит отметить практически доказанную возможность построения простых и эффективных волноводных поляризаторов. Выдвинутый автором принцип поляризационной селекции является оригинальным, так как отличается от типовых способов выделения поляризаций, использующих дополнительные металлические, либо естественно-анизотропные волноводные слои. Кроме того, отличительной и привлекательной чертой рассматриваемого механизма модовой фильтрации является его универсальность, так как на его основе можно отфильтровать как  $TE$ -, так и  $TM$ -волны.

Следует отметить, что используемые в работе численные методы решения волновых уравнений позволяют рассчитать и проанализировать работу интегрально-оптических элементов общего вида. Для анализа оптических нановолноводов на поверхностных плазмонах используется методика прямого решения уравнений Максвелла для неоднородных дисперсионных сред в пространственно-временных координатах.

Несмотря на то, что работы в области интегральной оптики в стекле проводились и в нашей стране и за рубежом, и были получены определенные результаты, автор нашел возможность развить свой достаточно общий подход к построению интегрально-

оптических схем различных топологий и различного функционального назначения в подложках оптического стекла методами ионного обмена и электростимулированной миграции ионов. Также автор показал и обосновал путем детального физико-математического моделирования расширенные возможности данной технологии, связанные с построением 3D интегрально-оптическим схем – двухслойных, с управляемым заглублением волноводного канала, а также схем с прогнозируемой асимметрией формы сердцевины волновода.

Можно констатировать, что автором проведено большое комплексное исследование различных интегрально-оптических волноводных конфигураций, использованное для их практического создания, начиная от разработки фотошаблона и заканчивая измерением оптических свойств того или иного волноводного элемента и схемы.

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

Решаемые диссертантом задачи относятся к классу разработок элементов микро- и нанооптики в области высоких технологий. Практическая ценность работы заключается в создании методов построения интегрально-оптических поляризационных элементов, построении научно-обоснованной технологии формирования компонентов интегральной оптики методами многоступенчатого ионного обмена и электростимулированной миграции ионов, разработке оптических элементов, использующих поверхностные плазмоны и возможности применения указанных разработок для создания одномодовых пассивных интегрально-оптических схем в стекле и иных элементов микрооптики различного функционального назначения.

**Прикладной аспект использования** результатов, полученных диссертантом, напрямую связан с созданием новых оптических компонент для инфокоммуникационных технологий, систем связи и сенсорных устройств. То есть достаточно большая часть результатов работы прямо связана с прикладными разработками элементов фотоники. Результаты диссертационной работы представляют интерес для использования в научных разработках учреждений Российской академии наук и отраслевых НИИ, на предприятиях, специализирующихся на создании приборов микро- и нанофотоники. Описанная в работе лабораторная технология формирования интегрально-оптических схем может послужить основой промышленной технологии. Рекомендую автору работы и его коллегам развивать данную технологию в этом направлении и придать ей инновационный характер.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Обоснованность и достоверность положений и выводов диссертанта основывается на проведенном им анализе значительного числа отечественных и зарубежных публикаций по проблематике исследования, компетентной постановкой исследовательской проблемы, цели работы и совокупности решаемых задач по ее достижению, адекватном и корректном применении известных научных методов теоретических и экспериментальных исследований.

Применяемое в работе физико-математическое моделирование предложенных оптических элементов и схем основано большей частью на использовании фундаментальных приемов решения дифференциальных уравнений в частных производных методами конечных разностей и конечных элементов. Для анализа оптических характеристик, естественно, производится рассмотрение конкретной специфики рассматриваемой электродинамической задачи с введением граничных и, при необходимости, начальных условий. Для расчетов дифракционных оптических наноструктур применен строгий метод связанных волн RCWA. Уравнения диффузии и электростатики, описывающие ионный обмен и стимулированную миграцию ионов во внешнем электрическом поле, также решались конечно-разностными методиками.

Для измерения параметров изготовленных оптических элементов применяются известные методы исследований интегрально-оптических схем с торцевым и призмным возбуждением волноводных мод, приемы поляриметрии, методы измерения затухания в волноводах, анализ структуры ближнего поля и т.п.

Приведенное описание применяемых в работе методов теоретических и экспериментальных исследований не вызывает замечаний.

#### **Оценка содержания диссертационной работы.**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 332 страницы машинописного текста, включая 185 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 268 источников. Материал изложен грамотно и хорошо структурирован. Диссертация содержит большой объем теоретических и экспериментальных результатов, полученных на высоком методическом и научно-техническом уровне.

**Основные научные результаты** опубликованы в 33 статьях в журналах из перечня ВАК, в 9 статьях в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, и 6 статьях, индексируемых в базе данных Web of Science, отражены в 8 патентах РФ и 4 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, 62 докладах в трудах конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 130 научных работ.

Содержание автореферата соответствует основным результатам и защищаемым положениям.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Экспериментальная часть исследований волноводных поляризационных преобразователей нового типа, видимо, все-таки ограничилась практическим доказательством предложенного нового физического метода преобразования поляризаций средствами интегральной оптики, так как подробные экспериментальные данные, к сожалению, не приводятся.

2. Следующее замечание касается всех глав работы: расхождение теоретических и экспериментальных результатов нуждается в более подробной физико-математической интерпретации, нежели это произведено автором.

3. В некоторых фрагментах главы 4, посвященной по большей части прикладным аспектам проводимого исследования, присутствует излишне подробное изложение деталей построения интегрально-оптических и нанофотонных схем.

Однако отмеченные недостатки и сделанные замечания не ставят под сомнение полученные результаты, не снижают научной новизны и практической ценности диссертационной работы и в целом не влияют на общее положительное впечатление от диссертации

На мой взгляд, диссертант успешно справился со всеми поставленными задачами.

#### **Заключение**

По объему проведенных исследований, научной новизне, практической ценности и достоверности полученных результатов можно сказать, что диссертация Векшина М.М. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой обоснованы теоретические положения и получены новые практические результаты, совокупность которых следует квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития физики и технологии построения интегрально-оптических элементов и схем, применяемых в фотонике и оптоэлектронике, в том числе с привлечением элементов нанооптики поверхностных плазмонов, Автореферат диссертации соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, правильно и полно отражая основное содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Векшина Михаила Михайловича «Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов микро- и нанофотоники» удовлетворяет критериям, предъявляемым к докторским диссертациям

«Положением о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции от 01.10. 2018 г.) (пп. 9 - 14), а ее автор, Векшин Михаил Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико- математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика.

Официальный оппонент,  
Директор НИИ физики  
Южного федерального университет  
(01.04.07 – Физика конденсированного  
состояния)



Вербенко Илья Александрович

Вербенко Илья Александрович

НИИ физики ФГАОУ ВО

«Южный федеральный университет»

344090, г. Ростов-на-Дону,

пр. Стачки, д. 194

тел.: +7(863)2433676

факс: +7(863)2434044

ilich001@ya.ru

<https://ip.sfedu.ru>

НИИ физики ЮФУ

Исх. № 604/351

от 26.09 2019 г.