

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

Диссертационная работа **Векшина Михаила Михайловича** посвящена разработке новых физических подходов и физико-технологических принципов формирования поляризационных элементов волноводной оптики на основе современных технологий интегральной фотоники и нанофотоники, созданию и исследованию экспериментальных образцов поляризационных волноводных элементов, а также оптических интегральных схем и устройств на их основе.

Актуальность темы диссертации

Развитие волоконно-оптических и квантовых систем связи, сенсорики, оптических устройств манипуляции микро- и нано-объектами, в том числе имеющих биологическую природу, подходов к реализации принципов квантовой криптографии и фотоники, требует широкого применения оптических интегральных схем, важным звеном которых являются поляризационные волноводные элементы. Рассматриваемая диссертационная работа направлена на проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований поляризационных эффектов в оптических волноводных структурах, развитие физико-математической модели формирования методами многоэтапного ионного обмена имеющих сложную конфигурацию различных элементов интегральной оптики в стекле, включая и устройства поляризационного типа, что в целом обуславливает ее актуальность и практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 332 страницах машинописного текста. Диссертация включает в себя 185 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 268 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель диссертационного исследования, дается краткая информация о структуре и содержании диссертации, приводятся девять положений, выносимых на защиту.

В **первой главе**, являющейся обзорной, рассмотрены оптико-физические процессы и принципы построения интегрально-оптических элементов и устройств. На основании проведенного в **подразделе 1.1** анализа литературы по физико-технологическим процессам, схемотехническим методам и приемам формирования пассивных интегрально-оптических схем, автор обращает внимание на требования, предъявляемые к компонентам квантовой интегральной оптики; описывает преимущества создания интегрально-оптических устройств на базе подложек из различных оптических стекол и используемые для этого технологические методы, отдавая предпочтение ионному обмену; формулирует одну из задач диссертационного исследования, по построению трехмерной физико-математической модели формирования волноводов методами ионного обмена, позволяющей разрабатывать с её использованием набор основных элементов пассивных интегральных схем; отмечает важность задачи исследования элементов волноводной нанофотоники, основанных на поверхностных плазмонах. В **подразделе 1.2** М.М. Векшин описывает поляризационные интегрально-оптические элементы и устройства, где им подчеркивается актуальность разработки гибридных схем обработки оптических сигналов с разнесением по поляризации; важность задачи построения простого и эффективного разделителя ТЕ/ТМ поляризаций излучения и создания новых подходов и оптико-физических принципов к построению поляризационных устройств интегральной оптики. Анализ интегрально-оптических схем для систем оптической связи и сенсорики, проведенный в **подразделе 1.3**, позволил ему в **подразделе 1.4** сформулировать задачи разработки и формирования оптических схем для сенсорных устройств с применением элементов микрооптики в стекле и плазмонной нанооптики, а также создания универсального программного обеспечения для оптимизации топологий интегрально оптических схем, в том числе с использованием поверхностных плазмонов.

Вторая глава посвящена разработке новых методов пассивного пространственного разделения и преобразования поляризационных составляющих оптического излучения и его поляризационной селекции, реализуемых посредством интегрально-оптических элементов и схем. Здесь представлены результаты исследования особенностей модового двулучепреломления в многослойных диэлектрических волноводах, как основы для создания ТЕ- и ТМ-

поляризаторов и заградительных фильтров (**подраздел 2.1**); рассмотрена разработка оригинальных методик преобразования плоскости поляризации в слабонаправляющих интегрально-оптических волноводах на основе изотропных диэлектрических слоёв (**подраздел 2.2**) и новых методов пространственного разделения ТЕ- и ТМ-волн в волноводных асимметричных Y-разветвителях и интерферометрах (**подраздел 2.3**). Среди большого количества новых и оригинальных результатов, полученных автором, здесь следует отметить предложенные им методы построения интегрально-оптических разделителей поляризации и создания ТЕ- и ТМ-поляризаторов, использующих высокое модовое двулучепреломление волноводных структур на основе трехслойных и четырехслойных волноводов из изотропных слоёв с диэлектрическими свойствами. Это позволило ему разработать волноводные разделители поляризаций, а также поляризаторы с эффективностью развязки, превышающей 25 дБ. Кроме того, для приложений в интегральной квантовой фотонике большой интерес может представлять предложенный М.М. Векшиным метод пассивного преобразования линейной плоскости поляризации в круговую, основанный на принципе модовой селекции, с применением асимметричного, частично заглубленного ионнообменного волновода в стекле.

В третьей главе приведены результаты расчетов и трехмерного моделирования процессов изготовления интегрально-оптических схем сложных топологий в подложках из силикатных стекол методами многоэтапного бинарного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов. Здесь автором разработана физико-математическая модель процессов формирования оптических волноводных элементов в силикатных стеклах методом многоэтапного ионного обмена (**подраздел 3.1**); представлены результаты расчета, изготовления и исследования одномодовых волноводных функциональных структур с прогнозируемыми физико-технологическими параметрами (**подраздел 3.2**); проведено моделирование направляющих оптических структур интегральной нанооптики, использующих щелевые плазмонные металлодиэлектрические волноводы (**подраздел 3.3**). Среди наиболее значимых результатов данной главы следует отметить построенную М.М. Векшиным физико-математическую модель многоэтапного термического и электростимулированного ионного обмена в силикатных стеклах, которая позволила ему, в сочетании с методами расчета

волноводных оптических устройств, реализовать планирование параметров технологического процесса для формирования целого ряда базовых пассивных волоконно-совместимых одномодовых компонентов оптических интегральных схем. В результате такие компоненты на рабочие длины волн 1,55 мкм и 0,85 мкм, имеющие уникальные характеристики, были автором диссертации изготовлены и экспериментально исследованы.

Четвертая глава диссертации посвящена прикладным аспектам разработанных им методов расчета, технологических процессов и экспериментальной реализации волноводных элементов с целью создания различных оптических схем для оптической связи и сенсорных устройств, с применением элементов интегральной оптики и микрооптики, сформированных на стеклянных подложках, а также элементов нанооптики, основанных на свойствах поверхностных плазмонов. Автором проведены экспериментальные исследования ТЕ- и ТМ-поляризаторов и преобразователя поляризации на основе ионообменных волноводов в стеклах (**подраздел 4.1**); разработаны и исследованы широкополосные интегрально-оптические многоканальные разветвители для мультиплексеров (**подраздел 4.2**); рассмотрены оптико-физические принципы построения микрооптических сенсорных устройств с применением поляризационных интегрально-оптических схем и схем на основе поверхностных плазмонов (**подраздел 4.3**). Здесь автором представлены, в частности, результаты изготовления на основе предложенных им методов эффективных ТЕ- и ТМ-поляризаторов на стеклянных подложках, прототипа преобразователей поляризации, волоконно-совместимых одномодовых разветвителей с рабочим диапазоном 1,3–1,6 мкм. Значительный практический интерес представляют и его результаты по анализу схем построения сенсоров химико-биологических реагентов с применением ионообменных волноводов в стекле, по экспериментальным исследованиям прототипа оптического плазмонно-резонансного биосенсора, по разработке и изготовлению методом электростимулированной миграции ионов серебра в стекле матрицы длиннофокусных микролинз для датчиков волнового фронта Шака-Гартмана.

В **заключении** приводятся основные результаты работы и выводы, которые представляются надежно обоснованными.

Новизна полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные результаты работы, сделанные по ним выводы и рекомендации, а также выносимые на защиту научные положения, являются новыми. Среди наиболее значимых результатов, полученным в ходе проведенного М.М. Векшиным диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

- Предложены и обоснованы методы разделения поляризационных компонент и поляризационной селекции излучения, реализуемых с использованием интегрально-оптических структур на основе многослойных канальных волноводов с высоким модовым двулучепреломлением, и построены соответствующие им физико-математические модели.

- Проведено физико-математическое моделирование технологического цикла формирования базовых компонентов одномодовых интегрально-оптических схем в силикатных стеклах методами многоэтапного бинарного ионного обмена и электростимулированной миграции ионов на основе совместного решения нелинейных уравнения диффузии и уравнения электростатики в двумерном пространстве, позволившее применить его результаты для разработки и формирования целого ряда пассивных волноводных элементов и структур.

- Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований оптических свойств поверхностных плазмонов в микрополосковых и щелевых волноводных схемах и дифракционных наноструктурах, в том числе с целью создания прототипа оптического плазмонно-резонансного биосенсора.

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

Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

- подтверждается корректным использованием автором современных представлений о физико-математических моделях исследуемых явлений и физико-технологических подходах к формированию оптических волноводных структур в стеклянных подложках; о методах расчетов поляризационных и дисперсионных характеристик оптических волноводных микро- и наноструктур, основанных на

полном векторном модовом анализе и анализе эволюции распространяющегося пучка; о подходах к численному решению многомерных нелинейных уравнений параболического типа, описывающих электростимулированную диффузию ионов и ионный обмен; согласованностью результатов расчетов и моделирования с экспериментальными данными;

- обеспечивается применением известных методов исследования и измерения оптических характеристик волноводов и волноводных структур, элементов микрооптики и схем с поверхностными плазмонами.

Научная и практическая значимость полученных в работе результатов

Результаты проведенного исследования представляют собой большой вклад в физику обсуждаемых в диссертационной работе явлений и эффектов, заключающийся, в частности, в фундаментальных исследованиях особенностей модовой структуры многослойных оптических волноводов и закономерностей формирования в них гибридных мод, разработке новых методов построения различных волноводных поляризационных элементов, теоретически обоснованных и экспериментально верифицированных. К важным фундаментальным исследованиям в области нанофотоники следует отнести и результаты разработок оптических элементов и схем с применением поверхностных плазмонов. Другая часть работы, посвященная созданию научно-обоснованной технологии формирования компонентов интегральной оптики различных топологий методом многоэтапного электростимулированного ионного обмена в стеклянных подложках с целью изготовления одномодовых пассивных интегрально-оптических схем и других элементов микрооптики различного функционального назначения, отражает разработанную лабораторную технологию, функционирующую в Кубанском государственном университете, и имеет большое практическое значение и перспективы развития, вплоть до промышленного серийного производства элементов интегральной оптики для систем связи, сенсорных устройств и других приложений фотоники.

Рекомендации по использованию

Результаты диссертационной работы Векшина М.М. могут представлять интерес для фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых в учреждениях РАН, таких как Научный центр волоконной оптики и Институт общей физики имени А.М. Прохорова (г. Москва); в Университете ИТМО (г.

Санкт-Петербург) и ФГБОУ ВО «ТУСУР» (г. Томск); в Государственном оптическом институте имени С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург); а также для прикладных разработок оптоэлектронных устройств и систем, проводимых в таких организациях, как ООО НТО «ИРЭ-Полус» (г. Москва), Акционерное общество «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова» (г. Екатеринбург), АО ФНПЦ НИИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова (г. Нижний Новгород), АО «Научно-исследовательский институт технического стекла» им. В.Ф. Солинова (г. Москва), «Центр волоконно-оптических систем передачи информации (Центр ВОСПИ)» (г. Москва), ФГУП РФЯЦ ВНИИ ТФ им. акад. Е.И. Забабахина (г. Снежинск).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации М.М. Векшина, базируется на адекватном использовании предшествующих результатов, большом объеме корректных физико-технологических и экспериментальных исследований, теоретическом анализе в рамках принятых приближений и грамотном применении методов численного моделирования.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами госбюджетных научно-исследовательских работ Кубанского государственного университета, по проектам РФФИ и в рамках других государственных НИР.

Следует отметить, что в диссертации и автореферате автор обозначил, в чем состоят полученные лично им новые результаты в этой области, и указал на научные работы и их результаты других исследователей по каждому направлению исследований. В частности, в области исследований ионообменных технологий формирования элементов микрооптики в стекле, помимо зарубежных работ, цитируются работы российских ученых Никанорова Н.В, Липовского А.А, Таганцева Д.К., и ряда других исследователей.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. Ключевую роль в реализации поляризационных устройств, использующих высокое модовое двулучепреломление, играет диэлектрический слой с высоким показателем преломления, в качестве которого автором использовалась пленка сульфида мышьяка As_2S_3 . Однако в диссертации не уделено должного внимания

описанию как физических и физико-химических свойств данного материала, так и технологическим особенностями его нанесения на волноводы, сформированные в стеклянных подложках.

2. Обширный и важный материал диссертации, представленный в оригинальных главах 2, 3 и 4 и имеющий большую научную и практическую значимость, очень трудно воспринимается в связи с его слабой структуризацией. Безусловно, на его основе было бы целесообразно издать монографию, но для этого необходимо дополнительное разделение немногочисленных подразделов на пункты, посвященные отдельным рассматриваемым вопросам.

3. Хотя текст диссертации написан хорошим грамотным языком, в нём очень велико количество опечаток и имеются стилистические неточности. Например, опечатки встречаются на стр. 56, 66, 85, 120, 127, 168, 177, 201, 219, 222, 272, и др.

Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать выводы по работе и положения, выносимые на защиту. Рассматриваемая диссертационная работа является завершённым научно-исследовательским трудом, достойным претендовать на получение докторской степени по физико-математическим наукам. Она характеризуется внутренним единством структуры, основанном на последовательном и комплексном решении проблемы построения оптических поляризационных волноводных элементов. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Недостатки, отмеченные выше, не влияют на общую положительную оценку работы, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне, вносящим весомый вклад в физику обсуждаемых в диссертации явлений. Она написана доходчиво и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны достаточно четкие выводы.

Текст диссертации соответствует как по содержанию, так и по качеству материалам, опубликованным автором в 130 печатных работах, в том числе в 33 статьях в журналах из перечня ВАК, 15 статьях в журналах, индексируемых в международных базах данных и в 8 патентах. Они неоднократно обсуждались на Российских и Международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов в области оптики.

Автореферат 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,
заведующий кафедрой электронных приборов
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники,
доктор физико-математических наук (01.04.03 – Радиофизика),
профессор по кафедре электронных приборов



Шандаров Станислав Михайлович

тел.: +7 (3822) 41-38-87

e-mail: stanislavshandarov@gmail.com

«29» сентября 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (просп. Ленина, 40, Томск, Томская область, 634050, тел.: +7(3822) 51-05-30, e-mail: office@tusur.ru, <https://www.tusur.ru>)

Подпись заведующего кафедрой, доктора физико-математических наук, профессора Станислава Михайловича Шандарова УДОСТОВЕРЯЮ:

Секретарь Ученого совета ТУСУР



Е.В. Прокопчук