

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Подпись аспиранта

Парфенов Михаил Владимирович

ФИО аспиранта

УПРАВЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ МОД В ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛНОВОДАХ НА ПОДЛОЖКАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)

физико-математические науки (1.3.4 Радиофизика)

отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)

03.06.01_03 Радиофизика (03.06.01 Радиофизика)

наименование направленности (шифр и наименование направления)

Академическая степень Исследователь. Преподаватель-исследователь

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный
руководитель:

д. ф.-м.н., г.н.с.-зав. лаб. ФТИ им. А. Ф. Иоффе
Шамрай Александр Валерьевич

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО
полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института электроники и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный
руководитель:

д.ф.-м.н., г.н.с.-зав. лаб. ФТИ им. А.Ф.Иоффе
Шамрай Александр Валерьевич
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО
полностью*

Рецензент:

д.ф.-м.н., профессор, профессор СПбГУТ
Дудкин Валентин Иванович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Объектом данного исследования являются оптические волноводы на подложках ниобата лития (LiNbO_3), для которых разрабатываются методы управления характером распространения оптического излучения, а именно преобразованием волноводных мод. Благодаря наличию ряда эффектов для реализации управления оптическим излучением (напр. электрооптического, акустооптического) и отработанной технологий формирования оптических волноводов с низкими потерями LiNbO_3 является одним из базовых материалов интегральной оптики и широко используется в качестве материала подложки для изготовления ряда интегрально-оптических устройств.

Принцип действия большинства интегрально-оптических устройств в той или иной степени связан с преобразованием волноводных мод, будь то пассивные элементы, как различные типы делителей оптической мощности, входящих в состав большинства интегрально оптических схем, или активные компоненты, как преобразователь поляризации на основе бегущей акустической решетки. Возможность точного управления преобразованием мод является ключевым фактором для разработки интегрально оптических устройств с высокими характеристиками. При этом стоит отметить, что требования к характеристикам интегрально-оптических устройств на ниобате лития неуклонно растут и уже приближаются к фундаментальным теоретическим пределам. Это обусловлено неуклонным ростом трафика в волоконно-оптических линиях связи, где широко используются интегрально-оптические устройства на основе ниобата лития, а также появлением новых областей применения, таких как прецизионные волоконно-оптические измерительные системы, линии квантовой оптической связи и др.

Разработка методов точного управления преобразованием мод за счет выбора топологии волноводной структуры или путем внешнего воздействия является одним из путей к повышению характеристик и расширению функциональных возможностей интегрально-оптических устройств на подложках ниобата лития. Так, например, речь может идти о расширении полосы частот модуляции, уменьшении управляющего напряжения, повышении коэффициента контраста модуляции, повышении эффективности детектирования света.

Таким образом, тема работы, посвященная управлению преобразованием мод в оптических волноводных структурах на подложках ниобата лития, является актуальной и представляет большой практический интерес при разработке новых эффективных устройств интегральной оптики для современных оптических систем передачи и обработки информации.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка новых методов управление преобразованием мод в волноводных структурах на подложках ниобата лития и повышение характеристик интегрально-оптических схем за счет управления преобразованием мод во входящих в их состав волноводных элементах.

Для достижения этой цели решались следующие научные задачи:

1. Разрабатывалась численная модель, описывающая локальное лазерное воздействие на диффузионные оптические волноводы в ниобате лития, и исследовалось фоторефрактивное управление волноводными делителями мощности оптического излучения.
2. Определялся характер влияния дополнительных покровных слоев на волноводные моды канальных оптических волноводов.
3. Выявлялись закономерности для преобразования слабо локализованной моды канального диффузионного волновода в ниобате лития в сконцентрированную моду тонкопленочной волноводной структуры и возможность применения данной структуры для повышения эффективности волноводных детекторов одиночных фотонов.
4. Теоретически и экспериментально исследовалось влияние локального лазерного окисления тонкой проводящей пленки на волноводные моды канального диффузионного волновода в ниобате лития.

5. Для демонстрации эффективности разработанные методы применялись для создания амплитудных модуляторов с повышенным коэффициентом контраста модуляции.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

1. Впервые проведены теоретические исследования влияния локального изменения показателя преломления на перераспределение оптической мощности в волноводных делителях X- и Y-типа.

2. Получены теоретические зависимости эффективности оригинального метода фоторефрактивного управления коэффициентом деления интегрально-оптических делителей мощности от положения локального лазерного воздействия относительно их топологии.

3. В предложенной конфигурации гибридного модового преобразователя на основе тонкопленочных структур обеспечивается уменьшение эффективного размера моды и его смещение к поверхности гибридного волновода. Показано, что использование преобразователя в такой конфигурации позволяет увеличить поглощение оптического излучения проводящими структурами, размещенными на поверхности волновода, на 4 порядка.

4. Впервые теоретически и экспериментально исследовано влияние локального лазерного окисления покровной тонкой пленки титана на потери и сдвиг фазы в канальных диэлектрических волноводах.

5. С использованием разработанных методов управления преобразованием мод экспериментально продемонстрировано повышение коэффициента контраста модулятора Маха-Цендера более чем на 20 дБ (до уровня 57 дБ).

Теоретическая и практическая значимость

Практическое значение работы состоит в следующем:

1. Продемонстрирована возможность повышения коэффициента контраста модуляции интегрально-оптического модулятора Маха-Цендера на значения до 57 дБ

2. Определена конфигурация преобразователя мод на основе тейпера из диоксида титана, позволяющая производить эффективный ввод оптического излучения в тонкопленочный волновод на подложке ниобата лития

3. Определена топология интегрально-оптического детектора одиночных фотонов на подложке ниобата лития с высокой эффективностью поглощения оптического излучения

Теоретическое значение работы состоит в следующем:

1. Разработана численная модель, описывающая влияние локального изменения показателя преломления, вызванное фоторефрактивным эффектом при лазерной засветке, на взаимодействие и преобразование мод в волноводных делителях оптической мощности на подложках ниобата лития.

2. Выявлен характер преобразования оптической моды диффузионного волновода на подложке ниобата лития под влиянием покрывающих его диэлектрических и проводящих плёнок, а также их композиции.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались и докладывались на конференциях: 18-ая международная конференция «Оптика лазеров» (ICLO 2018), Санкт-Петербург, 4-8 июня 2018 г.; международная конференция «SPIE Photonics Europe 2018», Франция, г. Страсбург, 22-26 апреля 2018 г.; международная конференция «CLEO/Europe-EQEC 2019», Германия, г. Мюнхен, 23-27 июня 2019 г.; международная конференция «EExPolytech 2019», г. Санкт-Петербург, 17-18 октября 2019 г.; 20-ая международная конференция «NEW2AN 2020», г. Санкт-Петербург, 26-28 августа 2020 г.; 19-ая международная конференция «Оптика лазеров» (ICLO 2020), г. Санкт-Петербург, 2-6 ноября 2020 г.; 20-ая международная конференция «Оптика лазеров» (ICLO 2022), Санкт-Петербург, 20-24 июня 2022 г.

Публикации

По результатам проведенной работы опубликовано 17 печатных работ. Все они опубликованы в изданиях, которые рецензируются в системах Scopus или Web of Science. 5 работ из них опубликованы в изданиях, входящих в сборник ВАК.

Представление научного доклада: основные положения

1. Фоторефрактивное изменение показателя преломления подложки ниобата лития при локальной лазерной засветке приводит к изменению характера распространения оптического излучения в диффузионных волноводах и может быть использовано для управления волноводными делителями оптической мощности, причем эффективность управления зависит от положения области засветки и топологии делителя.

2. Преобразователь мод на основе гибридной волноводной структуры в виде диэлектрического тейпера на поверхности диффузионного волновода на подложке ниобате лития обеспечивает смещение и локализацию пространственного распределения интенсивности оптического излучения, и повышение коэффициента поглощения поверхностной тонкой проводящей пленкой на несколько порядков.

3. Локальное лазерное окисление тонкой проводящей пленки может быть использовано для управления потерями в диффузионных волноводах на подложках ниобата лития, точность управления определяется разрешением лазерной системы и значением вносимых пленкой волноводных потерь.

4. Управление свойствами мод может быть использовано для повышения коэффициента контраста волноводных интерферометров, а высокая точность управления позволила повысить коэффициент контраста интерферометра Маха-Цендера до уровня 57 дБ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна работы, определена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, и приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы. Рассмотрены различные типы оптических волноводов и методы анализа их модового состава. Рассмотрен ниобат лития как материал для изготовления интегрально-оптических устройств. Кратко рассмотрены свойства кристалла, изложены вопросы изготовления оптических волноводов на его подложке. Рассмотрены волноводные свойства и методы анализа модового состава как стандартных градиентных оптических волноводов, изготовленных диффузионными методами, так и волноводов с высокой числовой апертурой, изготавливаемых по новой технологии с использованием тонкопленочного ниобата лития.

Вторая глава посвящена исследованию управления путем воздействия внешнего лазерного излучения на диффузионные оптические волноводы, изготовленные на подложке ниобата лития. Для управления был использован фоторефрактивный эффект, присущий кристаллу ниобата лития. Он проявляется в локальном изменении показателя преломления при его неоднородном облучении светом.

Была разработана численная модель для определения чувствительных к такому воздействию участков топологии интегрально-оптических устройств на основе диффузионных волноводов, изготовленных на подложке ниобата лития. В ней было использовано приближение, в котором градиентные волноводы для упрощения анализа заменены на двумерные волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления. Воздействие было представлено в виде однородного локального изменения показателя преломления $\Delta n = -10^{-3}$, что соответствует амплитуде изменения показателя преломления при фоторефрактивном эффекте.

Проведен анализ типовых конфигураций делителей мощности – Y-разветвителя и направленного X-ответвителя. Для анализа использовались два численных метода: метод распространения лучей (ВРМ) и метод конечных элементов. По результатам проведенного анализа были определены участки топологии волноводных делителей мощности, локальная засветка которых приводит к значительным изменениям их коэффициента деления, который определялся как $k = P_{out2} / (P_{out1} + P_{out2})$ (см. рис. 1), и может использоваться для управления и точной подстройки. Было выявлено, что положение данных участков и характер влияния на коэффициент деления зависят от топологии делителей, причем коэффициент деления может быть изменен как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Результаты проведенного численного моделирования хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, в которых участки волноводных делителей мощности избирательно засвечивались при помощи волоконного зонда, подводящего излучение от внешнего лазера к поверхности интегрально-оптического элемента (рис. 2). Ориентация участка чипа относительно зонда производилась при помощи трехкоординатной пьезоподвижки. В качестве источника излучения для локальной засветки использовался He-Ne лазер ($\lambda = 633$ нм). Зонд выполнен на основе стандартного оптического волокна SMF-28. Пятно, создаваемое зондом, составляло ≈ 10 мкм в диаметре со средней интенсивностью ≈ 100 Вт/мм². Для снятия вызванного фоторефракцией изменения показателя преломления исследуемый образец засвечивался источником ультрафиолета (при интенсивности ≈ 1 мВт/мм²). Измерение производилось при помощи DFB-лазера с мощностью излучения 20 мВт на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Достижимое изменение коэффициента деления при этом составило $\Delta k_{MAX} \approx 2$ %.

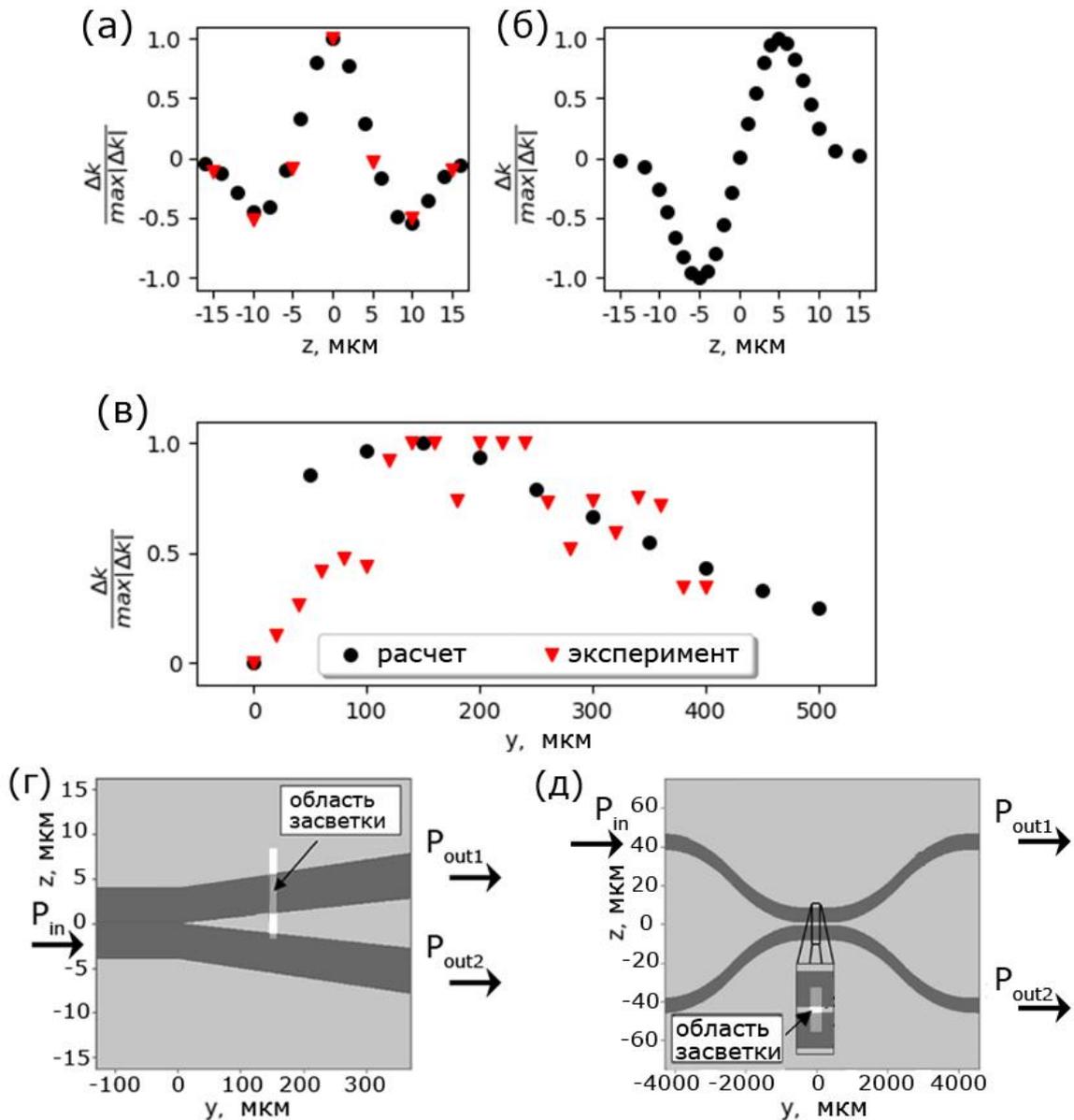


Рисунок 1. Зависимость изменения коэффициента деления волноводных делителей мощности от положения пятна засветки (а) в центральном поперечном сечении направленного X-ответвителя, (б) в поперечном сечении Y-разветвителя на участке ветвления волноводов, (в) вдоль одного из плеч Y-разветвителя и топологии исследованных Y-разветвителя (г) и направленного X-ответвителя (д)

Полученные теоретические и экспериментальные результаты были интерпретированы в рамках физической модели, основанной на локальном воздействии на волноводные моды оптических делителей. В случае топологии направленного X-ответвителя данное воздействие зависит от степени перекрытия полей мод системы связанных волноводов с площадью участка засветки. За счет различия в эффективности воздействия на моды оно проявляется в замедлении или ускорении перекачки мощности между волноводами в зависимости от расположения участка воздействия, чем объясняются полученные зависимости эффективности управления от координаты в поперечном сечении (рис. 1, а). Для Y-разветвителя воздействие приводит к возбуждению асимметричной моды, поэтому эффективность управления максимальна при локальной засветке одного из плеч в зоне ветвления, когда связь между соседними волноводами достаточно сильная (см. рис. 1, б, в).

Глава три посвящена исследованию влияния дополнительных поверхностных слоев и разработке метода контролируемого внесения потерь в волноводы, сформированные на подложке ниобата лития. Дополнительные потери в волноводах создавались за счет поверхностного металлического слоя. Было исследовано влияние металлических пленок на свойства волноводных мод при различных толщинах и материалах пленок. На примере приближенной волноводной модели был проведен расчет мод для волноводов, покрытых проводящим слоем, и по его результатам показано, что из трех выбранных к рассмотрению металлов – алюминия, золота и титана, широко используемых в интегральной оптике, титан обеспечивает наибольшие погонные потери (~ 1 дБ/мм), но при этом не приводит к существенной деформации распределения поля моды, а лишь к незначительному сдвигу модового пятна относительно поверхности.

Для управления потерями был предложен оригинальный метод локального лазерного окисления титановой пленки. Величина потерь определялась длиной участка волновода, покрытого металлическим титаном, которая постепенно уменьшалась при пошаговом лазерном окислении. Образовавшийся при этом диоксид титана практически не влиял на характеристики волноводной моды.

Экспериментальная реализация предложенного метода была выполнена с использованием зондовой установки (рис. 2). В ней в качестве лазера для внешней засветки топологии чипа через зонд был использован полупроводниковый лазер с непрерывным излучением ($\lambda = 980$ нм), зонд выполнен на основе волокна PM980-NP. Пятно, создаваемое на поверхности облучаемого чипа, составляло ≈ 7 мкм в диаметре со средней интенсивностью ≈ 1 кВт/мм². Облучаемый образец размещался на трехкоординатной пьезоподвижке, которая обеспечивала перемещение пятна засветки по запрограммированной траектории со скоростью 1 мм/с. Измерения характеристик образцов производились на длине волны $\lambda = 1550$ нм при помощи DFB-лазера с выходной мощностью 20 мВт. Для снятия фоторефрактивного эффекта образцы облучались источником ультрафиолета с равномерной интенсивностью ≈ 1 мВт/мм².

Образцы волноводов, использованных для исследования влияния лазерного окисления, были изготовлены методом термической диффузии титана, на их поверхности методом магнетронного вакуумного напыления была сформирована пленка металлического титана толщиной 5 нм. Микроскопические исследования морфологии и состава пленки после воздействия лазерного излучения при сканировании зонда показали, что при данной толщине (5 нм) происходит сквозное окисление с формированием аморфного диоксида титана (TiO₂), при этом в области окисления толщина пленки увеличивается с 5 до 13 нм. Непроводящий слой диоксида титана с такой толщиной, как показал отдельный расчет, не оказывает существенного влияния на распределение поля моды волновода (см. рис. 3).

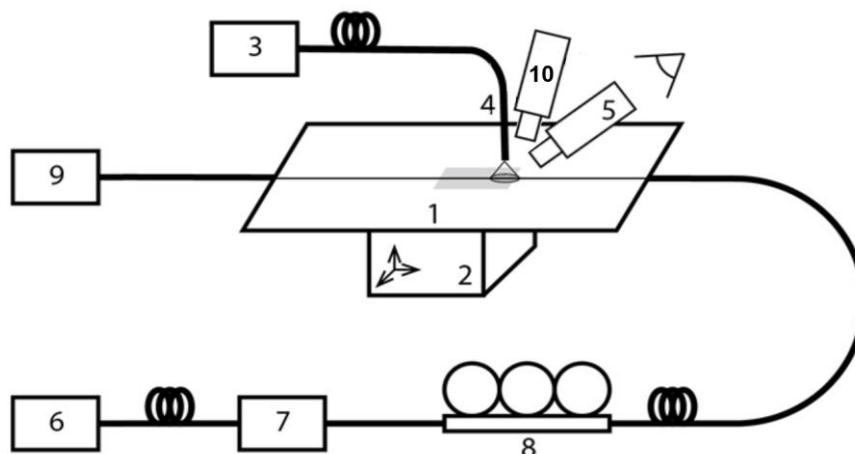


Рисунок 2. Установка для локального лазерного воздействия на участки волноводных делителей мощности на подложке ниобата лития.

- 1 – чип с волноводным устройством, 2 – трехосевая пьезоподвижка, 3 – лазер зонда, 4 – волоконный зонд, 5 – микроскоп, 6 – DFB-лазер, 7 – регулируемый аттенуатор, 8 – поляризационный контроллер, 9 – фотодетектор, 10 – источник ультрафиолета

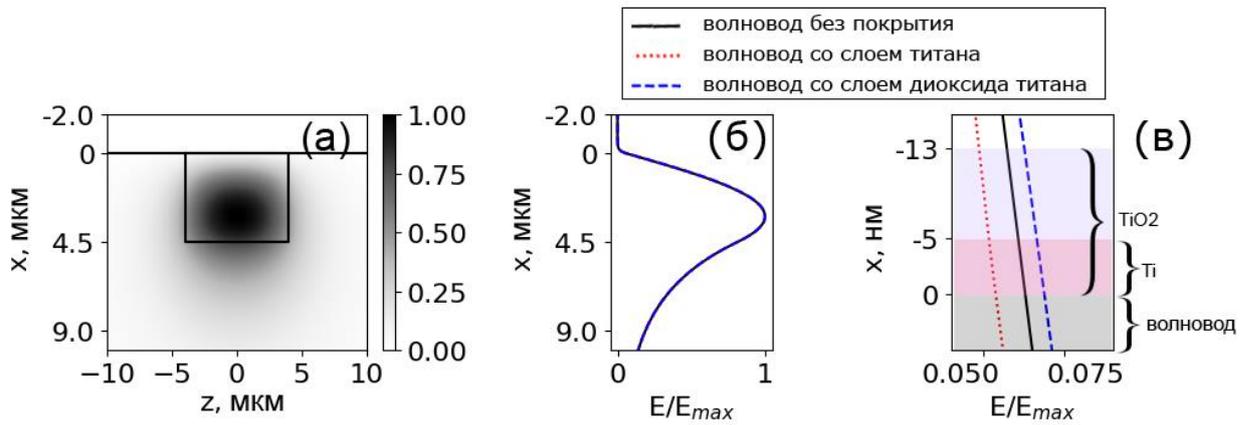


Рисунок 3. (а) Распределение электрического поля ТЕ моды в сечении канального волновода, (б) распределение электрического поля моды в центральном сечении (при $z=0$), (в) распределение электрического поля на участке вблизи поверхности волновода

Разработанный метод внесения в волноводный тракт управляемых потерь был использован для подстройки оптической мощности в плечах волноводного интерферометра, образующего модулятор Маха-Цендера. Балансировка проводилась путем последовательной засветки зондом титановой пленки в одном и втором плечах волноводного интерферометра. Продемонстрировано увеличение коэффициента контраста с 30 до 57 дБ (т.е. на 27 дБ). Также был обнаружен сдвиг фазы при проведении балансировки интерферометра, потенциально применимый для перестройки рабочей точки модулятора.

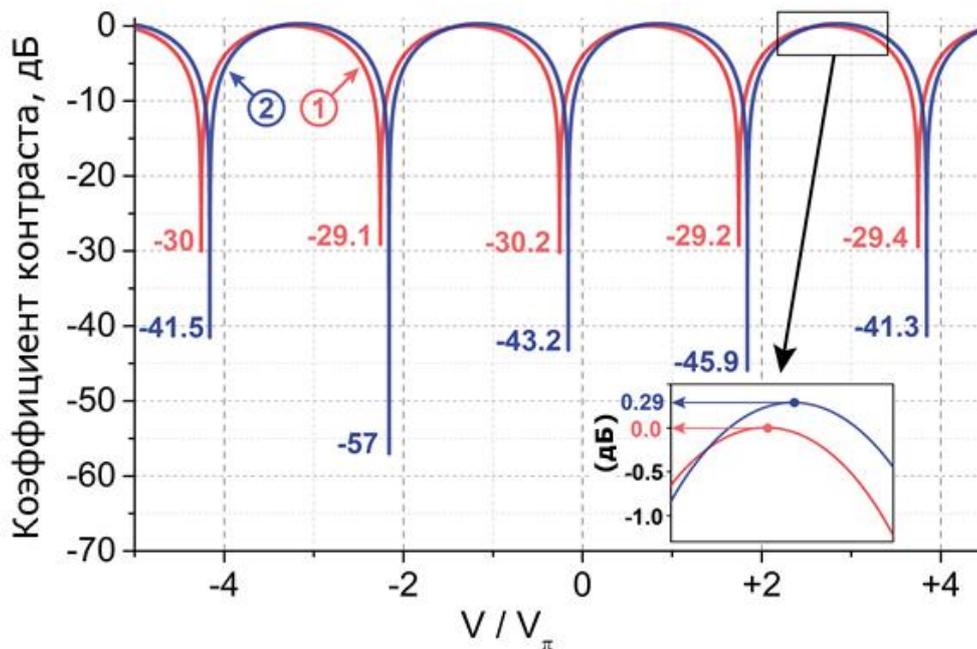


Рисунок 4. Изменение коэффициента контраста модулятора Маха-Цендера (1) – до балансировки плеч интерферометра и (2) после балансировки

Четвертая глава посвящена исследованию волноводных структур для преобразования слабо локализованной моды диффузионного волновода с низкой числовой апертурой, изготовленного на подложке ниобата лития, в сильно локализованную моду тонкопленочных волноводов с большой числовой апертурой.

Вначале была рассмотрена приближенная планарная модель волновода, в которой диэлектрический слой из материала с большим показателем преломления, чем у диффузионного волновода, расположен поверх диффузионного волновода и имеет толщину, плавно увеличивающуюся от нуля до некоторого фиксированного значения, при котором гибридная волноводная структура, образованная тонкопленочным слоем и диффузионным волноводом, имеет моду, чье распределение интенсивности локализовано в тонкой пленке (см. рис. 5).

Численное моделирование было проведено методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics. Решалась задача на определение собственных мод гибридной волноводной системы с плавно увеличивающейся толщиной тонкого покровного слоя. Анализ проводился для ТЕ поляризации в x-ориентации кристаллической подложки, которая представляет наибольший практический интерес с точки зрения применения в интегрально-оптических устройствах. По результатам проведенного моделирования было показано, что по мере возрастания толщины покрывающего слоя фундаментальная мода диффузионного волновода деформируется под действием слоя с высоким показателем преломления, а распределение интенсивности смещается в сторону покровного слоя. При этом эффективный показатель преломления моды возрастает. В определенный момент эффективный показатель становится больше, чем значение показателя преломления волноводного слоя в подложке ниобата лития и мода, изначально бывшая модой диффузионного волновода, становится модой объединенной гибридной системы. С некоторой толщины пленки ($h = 400$ нм при выбранном показателе преломления слоя $n_{\text{SiN}_x} = 2,5$) распределение поля моды локализуется в покрывающем слое.

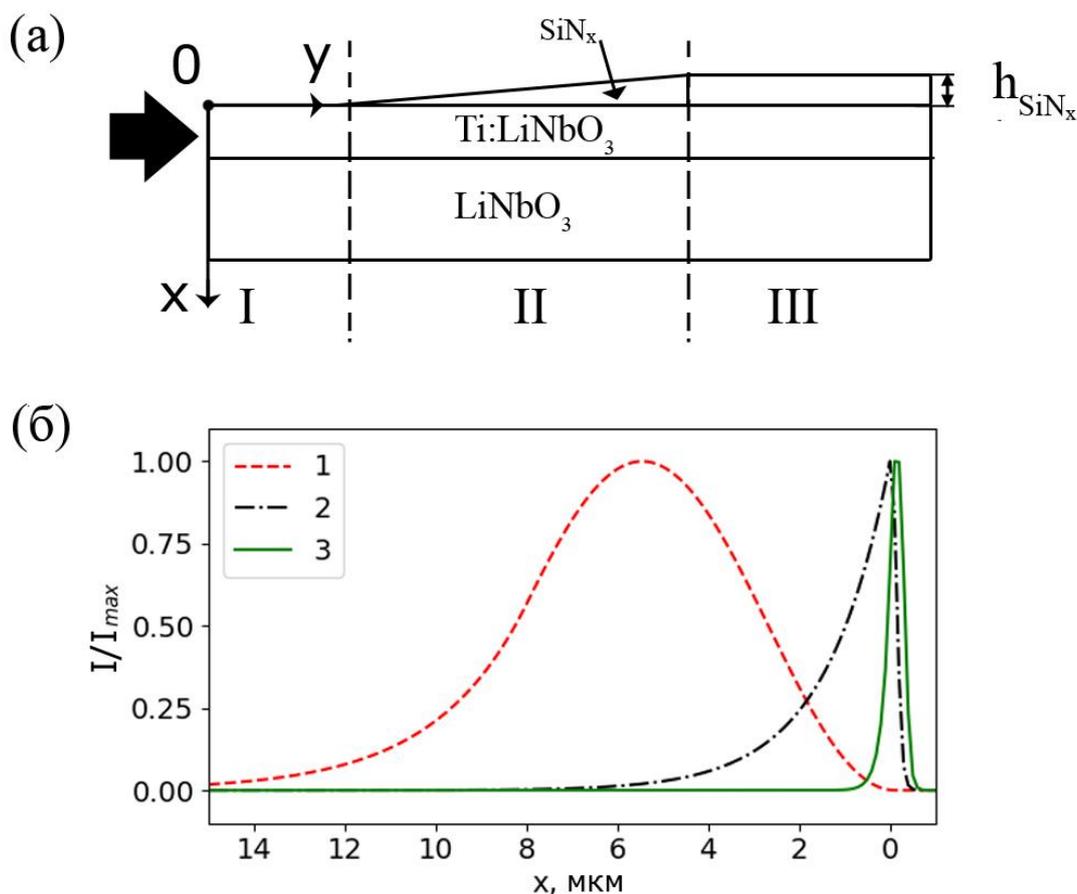


Рисунок 5. (а) Конфигурация преобразователя мод, (б) Профили распределения интенсивности мод в разных сечениях преобразователя: 1 - мода стандартного диффузионного волновода в ниобате лития (участок I), 2 – деформированная мода на участке II, 3 – мода покровного слоя на участке III

Более детальное численное моделирование было проведено для трехмерной модели с каналными волноводами. Покрывающий слой здесь представляет собой полосу с постоянной

толщиной и переменной шириной (тейпер), что удобно с точки зрения изготовления волновода (см. рис. 6). В качестве материалов покрывающей полоски были рассмотрены кремний Si ($n_{Si}=3,48$) и диоксид титана TiO_2 ($n_{TiO_2}=2,31$), широко используемые в интегральной оптике.

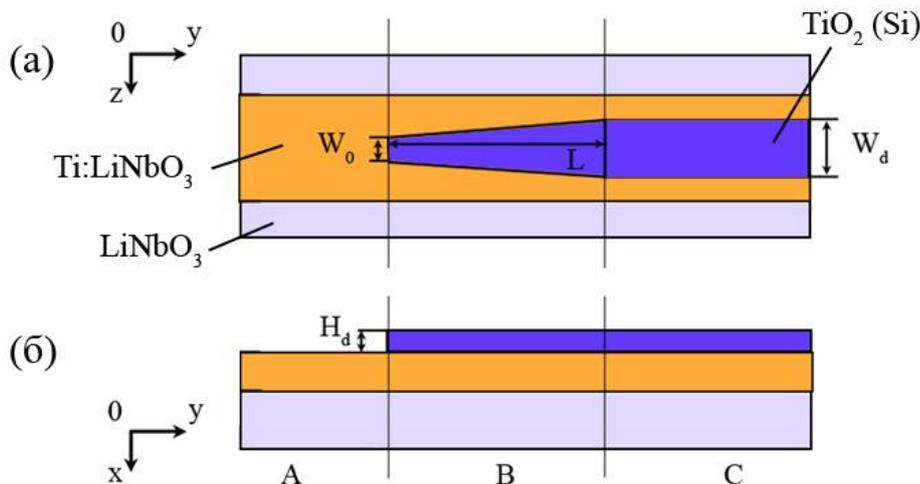


Рисунок 6. Конфигурация преобразователя мод с покрывающей диффузионный волновод диэлектрической полоской переменной ширины (тейпером) : (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку

Для обоих материалов были рассмотрены зависимости эволюции мод с изменением геометрических параметров полоски. Показано, что процесс преобразования мод в данной конфигурации сходен с планарным случаем. Детально был рассмотрен случай тейпера на основе диоксида титана, который имеет более мягкие требования к точности топологии тейпера, что удобно с точки зрения технологии изготовления. Для него были рассчитаны зависимости при изменении ширины полоски. Анализ проводился для обеих собственных поляризаций ТЕ и ТМ. Была определена конфигурация поляризационно селективного преобразователя мод, в которой при выбранных параметрах тейпера (при $H_d = 500$ нм, $W_0 = 1$ мкм, $W_d = 3$ мкм) преобразование происходит для ТЕ поляризованной моды, а мода с ТМ поляризацией остается неизменной и распространяется в диффузионном волноводе (см. рис. 7).

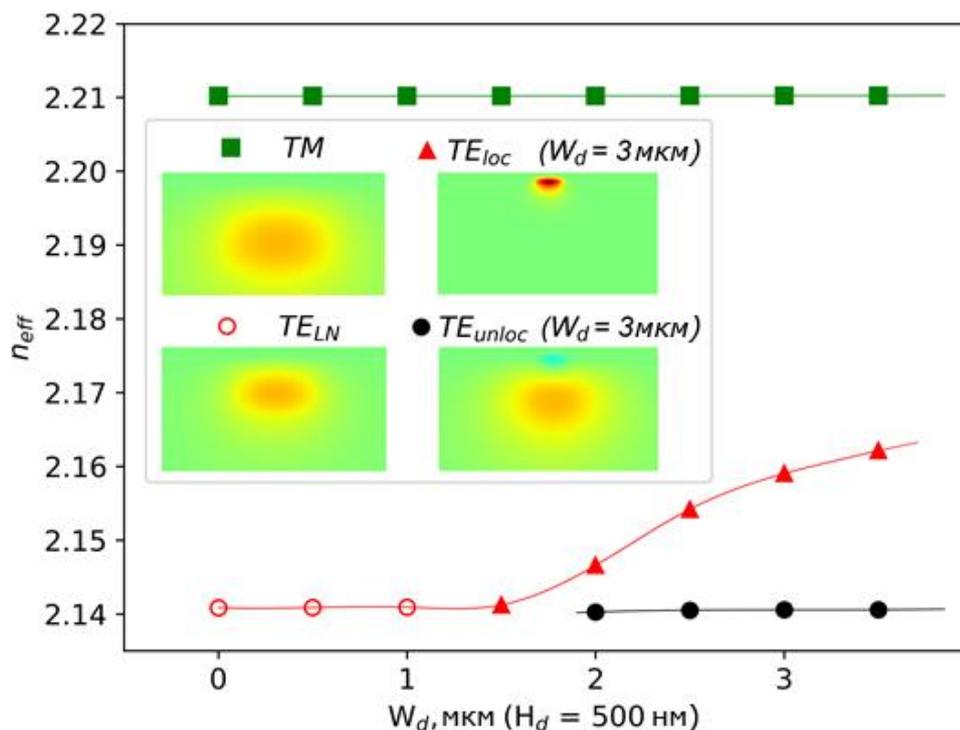


Рисунок 7. Характер эволюции мод при изменении ширины покрывающей полоски диоксида титана в трехмерной модели преобразователя мод (при $H_d = 500$ нм)

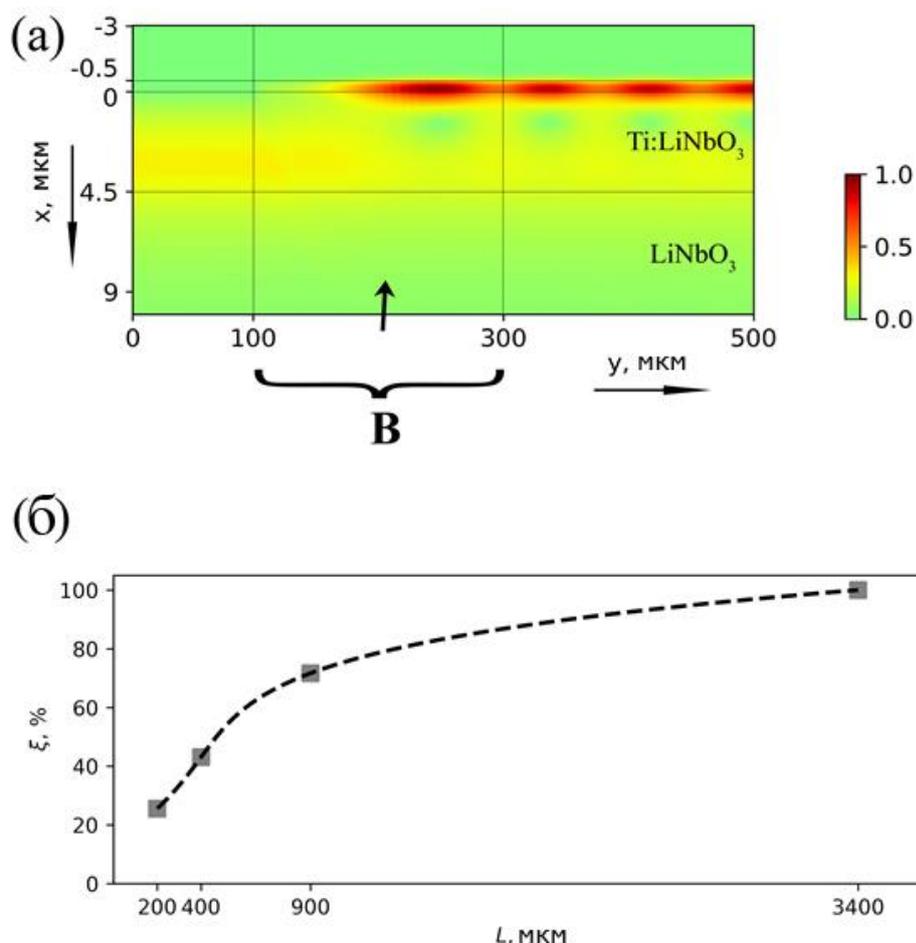


Рисунок 8. (а) Пример интерференции мод при длине тейпера из диоксида титана $L=200$ мкм и (б) зависимость эффективности преобразования мод от длины тейпера (при $H_d = 500$ нм, $W_0 = 1$ мкм, $W_d = 3$ мкм)

Для анализа влияния длины тейпера и процесса преобразования моды было проведено моделирование методом распространения лучей (BPM). При малой длине тейпера изменение параметров волноводной структуры с длиной происходит слишком быстро, преобразование перестает быть адиабатическим и его эффективность падает. При этом в структуре распространяются сразу две волноводные моды: локализованная в тонкопленочной полоске и нелокализованная мода интенсивность которой распределена в диффузионном волноводе. При распространении эти моды интерферируют между собой (см. рис. 8). При увеличении длины тейпера преобразование становится адиабатическим, возрастает его эффективность, соответственно, падает контраст картины интерференции мод.

Эффективность возбуждения локализованной моды была оценена из интерференционной картины и представлена на рис. 8. Из полученных результатов следует, что при достаточно большой длине тейпера (более 3 мм) можно получить преобразование почти со 100%-ной эффективностью.

Пятая глава посвящена вопросу поиска оптимальной топологии волноводной структуры для интегрально-оптического сверхпроводящего детектора одиночных фотонов. Топология таких детекторов предполагает размещение на волноводе наноструктуры из сверхпроводящего материала, которая поглощает фотоны. Одним из существенных факторов, влияющих на эффективность таких детекторов, являются степень перекрытия между модой волновода и сверхпроводящей структурой, которая определяет эффективность поглощения фотонов. Поскольку поперечная площадь сверхпроводящей структуры много меньше площади моды диффузионного волновода, то эффективность поглощения фотонов такой структуры очень низкая.

В терминах классической физики низкая эффективность поглощения фотонов выражается как низкие погонные оптические потери, вносимые сверхпроводящей структурой. Задача поиска оптимальной волноводной структуры сводится к задаче увеличения вносимых сверхпроводящей структурой погонных потерь за счет увеличения локализации интенсивности оптического излучения вблизи сверхпроводящей наноструктуры с использованием дополнительных покровных слоев.

Поиск оптимальной топологии первоначально проводился на приближенной планарной модели. По результатам анализа волноводных мод методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics было установлено, что значительное увеличение оптических потерь дает волноводная структура, в которой поверх расположенного на поверхности диффузионного волновода проводящего слоя (нитрида ниобия) наносится покровный диэлектрический слой (см. рис. 9). При этом было выяснено, что наибольшие потери имеет собственная мода диэлектрического покровного слоя вблизи условий отсечки.

Также при изучении характера эволюции мод было выяснено, что в случае присутствия проводящего слоя между диффузионным волноводом и диэлектрическим покровным слоем, при росте толщины диэлектрического слоя фундаментальная мода диффузионного волновода не деформируется, а собственная мода диэлектрического слоя с определенной его толщины появляется независимо. Можно сказать, что проводящий слой для волноводной системы играет роль металлического зеркала, разделяя волноводы и препятствуя проникновению оптического излучения из одного в другой. Поэтому было отмечено, что излучение из диффузионного волновода ниобата лития невозможно ввести в моду тонкой пленки покровного слоя без волноводного преобразователя мод, рассмотренного в четвертой главе и являющегося, по сути, необходимым элементом работы такого детектора.

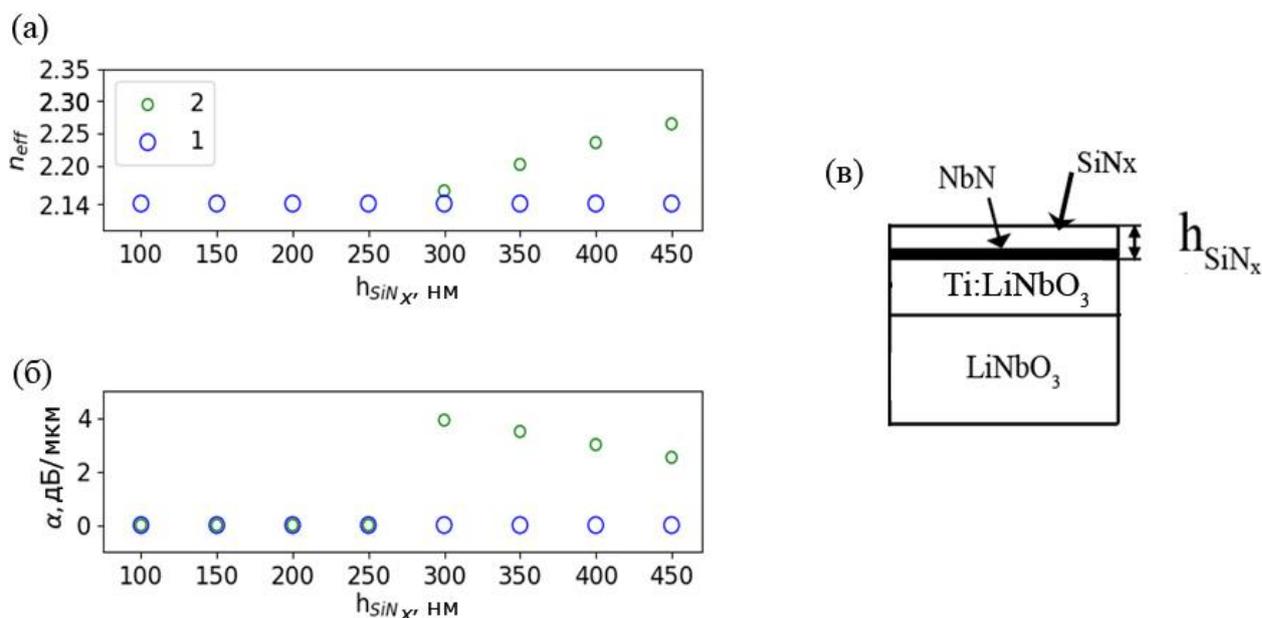


Рисунок 9. Зависимость эффективных показателей преломления (а) и погонных потерь (б) волноводных мод от толщины покровного слоя: 1 – мода волновода ниобата лития под проводящим слоем NbN, 2 - мода покровного слоя в области поглощения, (в) – конфигурация исследованного композитного волновода

После общего качественного рассмотрения, была рассмотрена трехмерная топология детектора. В трехмерном случае диэлектрический покровный слой имеет конечную ширину, а проводящий слой представляет собой наноструктуру из нитрида ниобия в виде меандра с периодом 200 нм и 50-процентным коэффициентом заполнения, толщиной $H_s = 5$ нм, причем сверхпроводящие нанопроводники уложены вдоль оптического волновода (см. рис. 10). Как уже было отмечено, для работы такого детектора требуется преобразователь мод, рассмотренный в

четвертой главе. В качестве материала для диэлектрического слоя, формирующего моду с малым поперечным сечением, были рассмотрены диоксид титана и кремний.

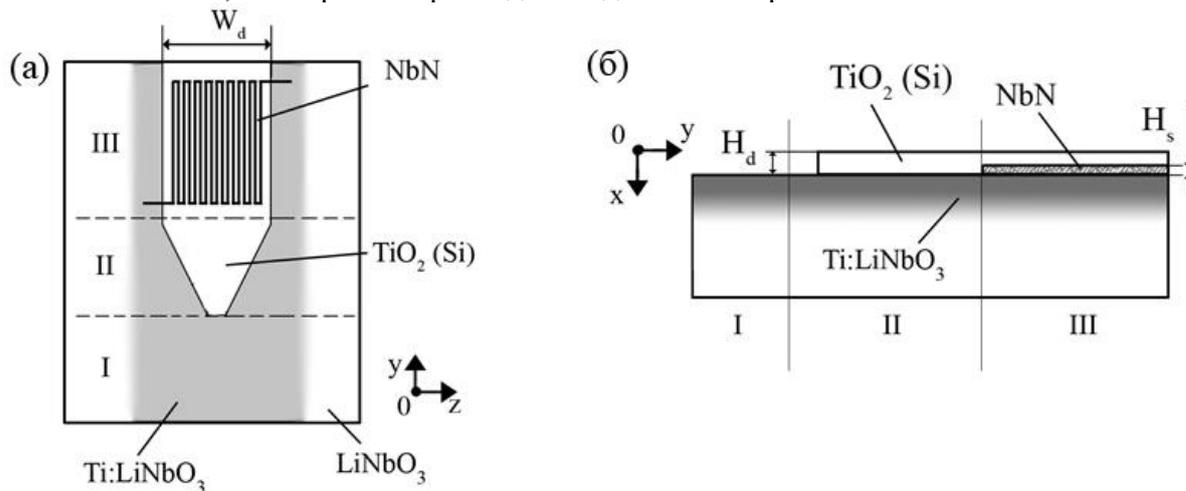


Рисунок 10. Предложенная топология интегрально-оптического сверхпроводящего детектора одиночных фотонов: (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку

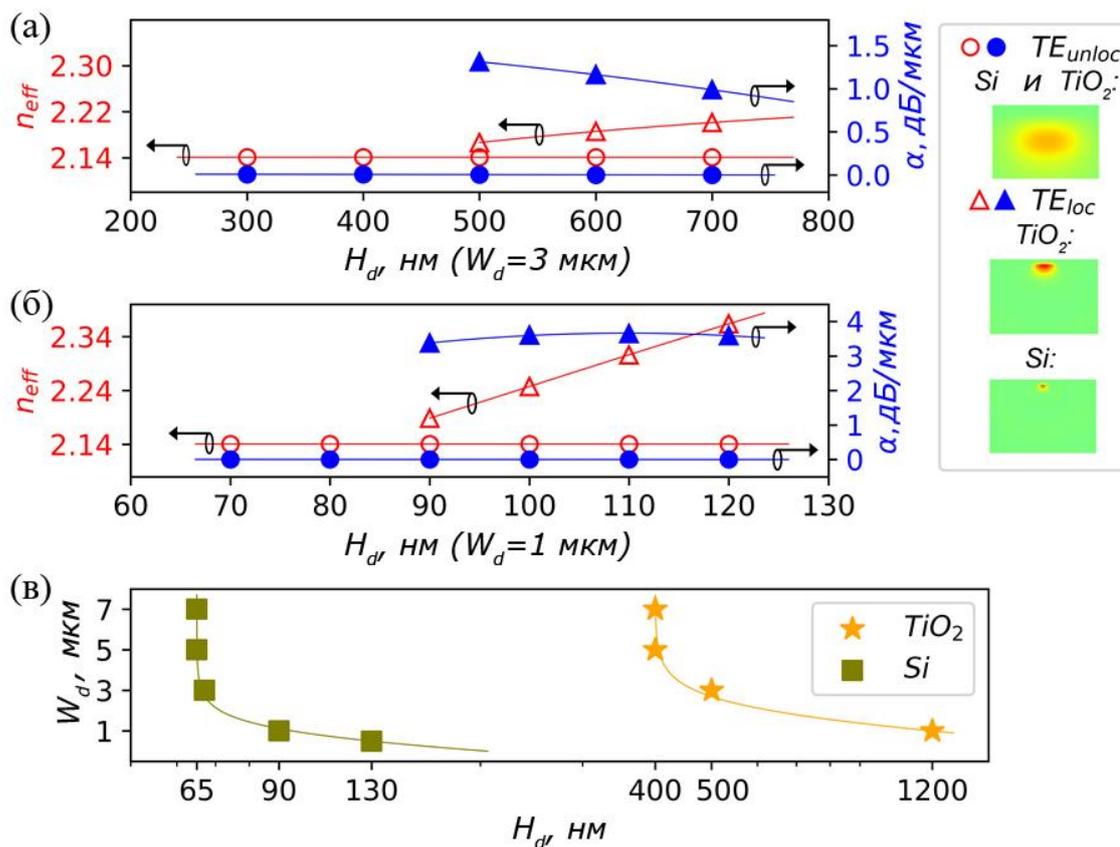


Рисунок 11. Зависимости эффективных показателей преломления и погонных потерь мод гибридной волноводной системы для трехмерной модели для (а) диоксида титана, (б) кремния и (в) условия отсечки для мод диэлектрических полосок

Было показано, что меньшая площадь моды, достижимая для кремниевой полоски, приводила к большим погонным потерям, чем в случае с диоксидом титана ($\alpha_{Si} = 3,65$ дБ/мкм и $\alpha_{TiO_2} = 1,31$ дБ/мкм, соответственно, см. рис. 11).

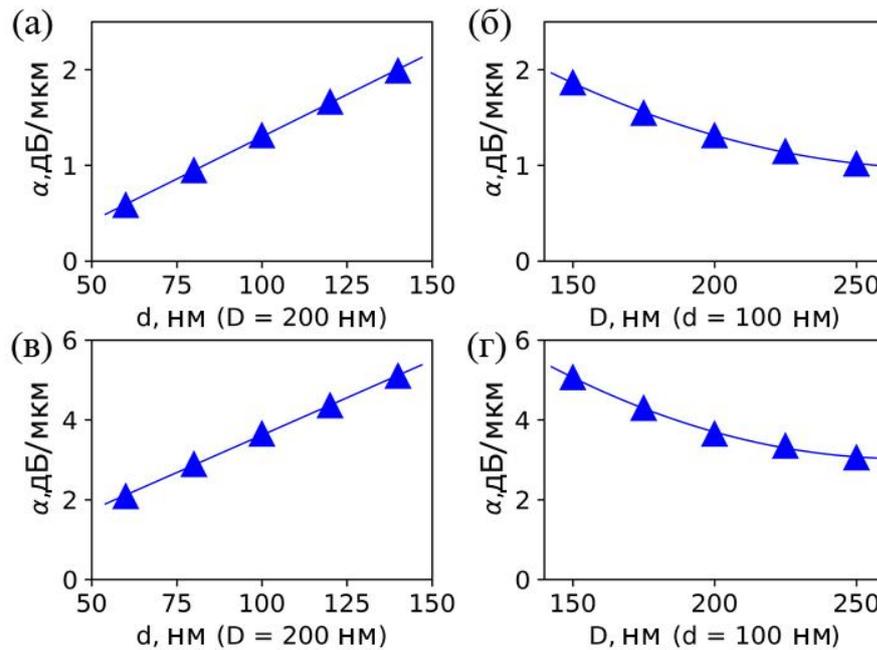


Рисунок 12. Зависимость поглощения, вызванного наноструктурой от ее геометрических параметров (ширина нанопроводника d и периода меандра D) для случаев диоксида титана (а, б) при $W_d = 3$ мкм, $H_d = 500$ нм и кремния (в, г) при $W_d = 1$ мкм, $H_d = 110$ нм

Теоретически достижимое значение погонных потерь в предложенной конфигурации детектора получается на 4 порядка выше, чем потери для детектора в виде наноструктуры на поверхности стандартных диффузионных волноводах на подложке ниобата лития без модового преобразователя.

Отдельно было показано, что геометрическая конфигурация проводников наноструктуры не сильно влияет на погонные потери и эффективность поглощения фотонов. Зависимость максимального коэффициента поглощения от ширины нанопроводника d и периода его меандра D представлена на рис 12. Варьирование этих параметров имеет относительно слабое влияние на погонные потери, что важно в контексте возможной дальнейшей оптимизации детектора.

Был также проанализирован случай, когда наноструктура детектора размещена не под диэлектрическим покровным слоем, а над ним. В таком случае сами значения погонных потерь оказались ниже. Если для кремния различие было довольно незначительно ($\alpha_{\text{Si}} = 1,98$ дБ/мкм против 3,65 дБ/мкм), то для полоски диоксида титана поглощение сильно упало ($\alpha_{\text{TiO}_2} = 0,15$ дБ/мкм против 1,31 дБ/мкм), что связано со степенью локализации моды в диэлектрической полоске.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектом исследований были волноводные структуры на подложках ниобата лития для реализации преобразования мод. В работе были разработаны новые методы для управления преобразованием волноводных мод в данных структурах. В теоретических исследованиях использовались численный метод анализа волноводных мод на основе метода конечных элементов. Эволюция преобразования анализировалась с использованием метода распространения лучей ВРМ. В экспериментальных исследованиях для управления преобразованием мод использовался метод локального лазерного облучения с использованием волоконно-оптического зонда.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Была разработана численная модель для описания изменения характера распространения оптического излучения, вызванного локальным изменением показателя преломления в топологии диффузионных оптических волноводов в ниобате лития. При помощи разработанной модели были определены участки топологии волноводными делителями мощности, в которых локальное возбуждение фоторефрактивного эффекта позволяет производить перестройку коэффициента деления.
2. Определен характер воздействия покрывающих диэлектрических и проводящих слоев на изменение распределения интенсивности, эффективный показатель преломления и погонные потери мод оптических диффузионных волноводов на подложке ниобата лития.
3. Выявлен характер преобразования моды диффузионного волновода в моду диэлектрического тонкопленочного волновода под влиянием покрывающего диффузионный волновод диэлектрического слоя переменного сечения.
4. Продемонстрирована возможность формирования за счет комбинации проводящего и диэлектрического слоев, сформированных на поверхности диффузионного волновода, моды с высокими погонными потерями (до 1-4 дБ/мкм)
5. Предложена волноводная конфигурация сверхпроводящего детектора одиночных фотонов на подложке ниобата лития с высокой эффективностью поглощения света
6. Теоретически и экспериментально исследовано влияние локального лазерного окисления тонкой титановой пленки на волноводные моды канального диффузионного волновода в ниобате лития. По результатам работы показана возможность повышения коэффициента контраста амплитудных модуляторов до 57 дБ

Заключение

В рамках проведенной работы был выполнен ряд разноплановых исследовательских задач, имеющих как теоретическую, так и непосредственную практическую значимость. По каждому пункту поставленных задач проведена работа и получены результаты. Таким образом, в рамках работы аспиранта все поставленные задачи были выполнены, а цель работы - достигнута.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной
работы (диссертации)
Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

1. Фоторефрактивная подстройка коэффициента деления интегрально-оптического направленного X-ответвителя на подложке ниобата лития / **Парфенов, М. В.**, Тронеv, А. В., Ильичев, И. В., Агрузов, П. М., Шамрай, А. В. // Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45 (5). – С. 3-5.
2. Перераспределение оптической мощности в плечах волноводного Y-разветвителя при локальной внешней засветке подложки ниобата лития / **Парфенов, М. В.**, Тронеv, А. В., Ильичев, И. В., Агрузов, П. М., Шамрай, А. В. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46 (1). – С. 8-11.
3. Лазерная модификация титановой пленки на поверхности оптических волноводов в ниобате лития / Тронеv А. В., **Парфенов, М. В.**, Соломонов, Н. А., Ионов, А. М., Божко, С. И., Ильичев, И. В., Агрузов, П. М., Шамрай, А. В. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46 (17). – С. 51-54.
4. Повышение эффективности интегрально-оптического сверхпроводящего датчика одиночных фотонов на подложке ниобата лития за счет дополнительного покровного слоя с высоким показателем преломления / **Парфенов, М. В.**, Шамрай, А. В. // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46 (16). – С. 39-42.
5. Преобразование мод в гибридных волноводных структурах на основе ниобата лития для согласования со стандартным одномодовым оптическим волокном / **Парфенов, М. В.**, Агрузов, П. М., Ильичев, И. В., Усикова, А. А., Шамрай, А. В. // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92 (1). – С. 113-117.

Публикации в других изданиях

1. Precise correction of integrated optical power splitters based on lithium niobate substrates by photorefractive effect local excitation / **Parfenov, M.**, Tronev, A., Ilichev, I., Agruzov, P., Shamrai, A. // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2020. – v. 126 (5). – 93.
2. Design of hybrid waveguide structures for high-efficiency integrated optical superconducting single photon detectors on Ti:LiNbO₃ Waveguides / **Parfenov, M.**, Agruzov, P., Ilichev, I., Bozhko, S., Shamrai, A. // IEEE Photonics Journal. – 2021. – v. 13 (6). – 6600107.
3. Superconducting Single-Photon Detector on Lithium Niobate Waveguides / Tronev, A.V., **Parfenov, M. V.**, Ilichev, I. V., Agruzov, P. M., Ionov, A. M., Klimov, A. I. et al. // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – 2020.
4. Direct Laser Modification of Thin Titanium Film for Fine-tuning of Photonic Lithium Niobate Circuits / Tronev, A.V., **Parfenov, M. V.**, Ilichev, I. V., Agruzov, P. M., Ionov, A. M., Orlova, N. N. et al. // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – 2020.
5. Optical Loss Control in Lithium Niobate Waveguides via Direct Laser Modification of Covered Titanium Film / Tronev, A. V., **Parfenov, M. V.**, Solomonov, N. A., Ionov, A. M., Bozhko, S. I., Ilichev I.V. et al. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, Springer. – 2020. – 394.
6. Fabrication of high extinction ratio lithium niobate integrated optical modulators using photorefractive trimming / Tronev, A., **Parfenov, M.**, Agruzov, P., Shamray, L., Shamray, A. et al. // Proc. SPIE 10535, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXII – 2018. – 1053527.
7. High extinction ratio integrated optical modulator for quantum telecommunication systems / Tronev, A., **Parfenov, M.**, Agruzov, P., Ilichev, I., Shamray, A. // Journal of Physics: Conference Series – 2018. – v. 951(1). – 012002.

8. Extinction ratio improvement of lithium niobate modulators for quantum communication systems / Tronev, A. V., Ilichev, I. V., Agruzov, P. M., **Parfenov, M. V.**, Shamray, L. V., Shamray, A. V. // Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018. – 2018. – P.438.
9. Extinction Ratio Improvement of LiNbO3 Integrated Optical Interferometers by Photorefractive Tuning of Y-branches / **Parfenov, M. V.**, Tronev, A. V., Petrov, A. N., Agruzov, P. M., Ilichev, I. V., Shamrai, A. V. // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019. – 2019. – 8906849. – P. 296-297.
10. Additive fiber optic probe technology for precise trimming of high-performance lithium niobate photonic integrated circuits / Tronev, A., **Parfenov, M.**, Agruzov, P., Ilichev, I., Shamrai, A. // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2019. – 2019. – 8873076.
11. Superconducting single-photon detector for lithium niobate integrated quantum photonic at telecom wavelengths / Agruzov, P., Ionov, A., Chekmazov, S., Bozhko, S., Ilichev, I., Tronev, A., **Parfenov, M.**, Shamrai, A. // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2019. – 2019. – 8871852.
12. The influence of a local refractive index change on the splitting ratio of an integrated optical Y-branch on lithium niobate substrate / **Parfenov, M. V.**, Shamrai, A.V. // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). – 2022. – P.1.

Аспирант _____ **Парфенов М.В.**