

На правах рукописи



Зарецкая Галина Александровна

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОВОЛНОВОДОВ  
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВОДНЫХ  
ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУР

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре физической электроники и технологии.

Научный руководитель: **Калиникос Борис Антонович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты: **Шамрай Александр Валерьевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник – заведующий лабораторией ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», г. Санкт-Петербург;

**Лысак Владимир Валерьевич**, доктор физико-математических наук, ведущий инженер-технолог ОАО «Завод Магнетон», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «23» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.08  
кандидат технических наук, доцент



Смирнов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Непрерывно растущие требования, предъявляемые к информационно-телекоммуникационным системам, а также к устройствам радиолокации и навигации, разрабатываемым в настоящее время, обуславливают необходимость поиска новых способов хранения, обработки и генерации сигналов сантиметрового и миллиметрового СВЧ-диапазонов. Эти требования направлены на улучшение быстродействия, пропускной способности, скорости передачи данных, помехоустойчивости и др. Сравнительно недавно было показано, что одним из наиболее перспективных способов достижения таких целей является создание новых СВЧ-устройств на основе принципов радиофотоники. Одним из ведущих направлений этой научно-технической области является «интегральная радиофотоника».

Основными элементами компонентной базы интегральной радиофотоники являются оптические микроволноводы. Важнейшая особенность микроволноводов заключается в возможности их реализации в едином технологическом цикле при помощи методов современной микроэлектронной технологии. Это позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики приборов и устройств по сравнению с существующими аналогами.

Одним из факторов, ограничивающих применение оптических микроволноводов в радиофотонных приборах и устройствах, работающих в линейном режиме, являются их потери. Потери в оптических микроволноводах в зависимости от их физической природы разделяют на несколько составляющих: потери, обусловленные рассеиванием волны на поверхностных неоднородностях на границе раздела сред; потери, обусловленные собственными потерями материалов, из которых изготовлен микроволновод и окружающее его пространство; излучательные потери на изгибе волноводов. Как показывает анализ литературы, особое внимание уделяется исследованию потерь, обусловленных рассеиванием на поверхностных неоднородностях на границе раздела сред, а также потерям на изгибе волновода. В то же время, к моменту начала работы над диссертацией отсутствовала электродинамическая теория, адекватно описывающая потери, обусловленные собственными потерями материалов, из которых изготовлен микроволновод и окружающее его пространство. Кроме того, практически было не изучено влияние геометрических и материальных параметров оптических волноводов на значение вносимых потерь.

В схемах интегральных оптических приборов и устройств основными функциональными элементами являются связанные оптические микроволноводы. Задача расчета характеристик передачи связанных оптических микроволноводов была рассмотрена в ряде работ. Однако существовавшие теории, описывающие связь прямоугольных диэлектрических микроволноводов, были не применимы для определения характеристик передачи сильно связанных микроволноводов. При этом строгая электродинамическая теория, описывающая связь интегральных оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения отсутствовала.

На интегральных оптических микроволноводах реализуются различные системы обработки радиосигнала. Зачастую основными элементами таких систем являются кольцевые резонаторы. В интегральных радиофотонных устройствах можно различить несколько типовых структур последовательных соединений кольцевых резонаторов. Первая типовая структура использует микроволновод, последовательно нагруженный кольцевыми резонаторами, разделёнными линиями задержки. Вторая типовая структура использует последовательное включение оптических кольцевых резонаторов, разделённых линиями задержки.

Задача расчета и проектирования таких структур носит взаимосвязанный характер. Так, при расчете результирующей характеристики передачи необходимо учитывать как характеристику передачи отдельно взятого резонатора, нагруженного подводящей и отводящей линиями, так и формирование итоговой характеристики передачи с учетом всех элементов структуры. Однако на момент начала работы над диссертацией комплексного исследования типовых последовательных соединений кольцевых резонаторов не производилось. Также было недостаточно исследовано применение таких структур для фильтрации СВЧ-сигнала.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о перспективности и актуальности исследований особенностей волновых явлений в интегральных оптических микроволноводах и волноведущих структурах на их основе.

**Целью диссертационной работы** являлось исследование свойств интегральных оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения, а также передаточных характеристик оптических волноведущих структур, построенных на их основе.

В соответствии с поставленной целью **основными задачами** диссертационного исследования были:

1. Разработка аналитической теории оптических потерь прямоугольного микроволновода, обусловленных собственными потерями материалов его диэлектрической волноведущей структуры.
2. Анализ влияния геометрических и материальных параметров диэлектрического прямоугольного микроволновода на дисперсионные свойства и собственные потери двух основных мод ортогональной поляризации.
3. Разработка аналитической теории связи диэлектрических волноведущих структур, состоящих из регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
4. Разработка аналитической теории связи двух регулярных диэлектрических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
5. Исследование характеристик передачи недиссипативной системы, состоящей из двух регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
6. Исследование характеристик передачи кольцевых резонаторов на оптических микроволноводах и их применение для фильтрации радиосигнала.

Подчеркнем, что все эти задачи базируются на электродинамической теории.

**Объектом исследования** являются интегральные оптические микроволноводы и волноведущие структуры на их основе.

**Предметом исследования** являются особенности формирования дисперсионных характеристик и собственных потерь интегральных оптических микроволноводов и характеристик передачи волноведущих структур на их основе.

**Методы исследования**, применяемые в диссертации, заключаются в использовании подходов радиофизики, методов математической физики и физики колебаний и волн. В частности, для разработки аналитической теории потерь оптических микроволноводов производилось решение уравнений Максвелла, а для разработки аналитической теории связи регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения использовались уравнения электродинамики и теория связанных мод с введением эффективных источников возбуждения.

**Обоснованность и достоверность** полученных в работе результатов и выводов подтверждается корректным использованием методов математической

физики, а также сопоставлением результатов разработанной теории с экспериментальными данными.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Построена электродинамическая аналитическая теория оптических потерь прямоугольного микроволновода, обусловленных собственными потерями материалов его волноведущей структуры.
2. Выполнены теоретические исследования особенностей формирования собственных потерь оптических микроволноводов.
3. Показано, что в формировании частотной характеристики декремента затухания, распространяющихся колебаний в интегральном оптическом микроволноводе прямоугольного поперечного сечения, участвуют два процесса: перераспределение энергии в структуре волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости.
4. Обнаружено, что дисперсия групповой скорости, обусловленная геометрией волноведущей структуры, приводит к образованию локального максимума на частотной характеристике декремента затухания.
5. Построена строгая электродинамическая аналитическая теория связи диэлектрических волноведущих структур, состоящих из регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
6. Выявлено, что с увеличением разницы в показателях преломления системы волновод-окружающая среда происходит увеличение длины области связи, при которой вся мощность переизлучается из одного волновода в другой. Выявленная зависимость имеет ярко выраженный локальный минимум, обусловленный конкуренцией двух процессов, заключающихся в изменении дисперсии групповой скорости и интеграла перекрытия взаимодействующих мод, зависящих от геометрии волноведущей структуры.
7. Обнаружен эффект, заключающийся в том, что отношение поверхностной и объемной частей коэффициентов связи при выбранных геометрических размерах поперечного сечения и материальных параметрах системы, состоящей из двух связанных идентичных микроволноводов, есть константа, не зависящая от расстояния между микроволноводами.
8. Показано, что разработанная аналитическая теория связи может применяться для анализа характеристик передачи непараллельных диэлектрических волноведущих структур.

Новые научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать основные **научные положения**:

1. Путем подбора параметров волноведущей структуры возможно осуществление случая, когда потери несущей рабочей сигнал  $E_x^{11}$ -моды оптического микроволновода много меньше потерь одновременно возбуждаемой  $E_y^{11}$ -моды, за счет чего реализуется квазиодномодовый режим работы микроволновода без контроля поляризации входного оптического излучения.
2. Подбор топологии и материалов, из которых изготавливается структура связанных оптических микроволноводов, дает возможность минимизировать длину переизлучения и, соответственно, размеры переизлучающих структур.
3. Уменьшение расстояния между связанными микроволноводами приводит к уменьшению крутизны нарастания зависимости длины переизлучения от контраста показателей преломления. Таким образом, путем уменьшения расстояния между связанными микроволноводами возможно минимизировать влияние технологической погрешности показателей преломления на значения характеристик передачи при изготовлении интегральных оптических структур, построенных на их основе.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в следующем:

1. Результаты аналитической теории оптических потерь в микроволноводах могут быть использованы для определения геометрии оптических микроволноводов, имеющих оптимальные параметры.
2. Показано, что путем подбора геометрических и материальных параметров волноведущей структуры возможна реализация случая, когда декремент затухания  $E_y^{11}$ -моды значительно выше декремента затухания  $E_x^{11}$ -моды, т. е. возможна реализация квазиодномодового режима работы оптического микроволновода, не требующая контроля поляризации входного оптического излучения.
3. Результаты аналитической теории связи диэлектрических волноведущих структур, состоящих из регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения могут быть использованы для решения широкого круга задач, имеющих перспективные применения в интегральной оптике и интегральной радиофотонике.

4. На основе разработанных теорий созданы оригинальные программы, позволяющие численно рассчитывать дисперсионные свойства и собственные потери интегральных оптических микроволноводов, а также характеристики передачи базовых структур, построенных на их основе.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на ряде конференций и семинаров различного уровня, в частности, на международной конференции «PIERS» (Италия, Рим, 2019 г.), на международной конференции «ITNT» (Россия, Самара, 2019 г.), на международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Россия, Санкт-Петербург, 2018 г.), на всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Россия, Санкт-Петербург, 2018, 2019 гг.), на всероссийской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб» (Россия, Санкт-Петербург, 2018, 2019 гг.), на научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» (Россия, Санкт-Петербург, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 16 печатных работ, в том числе 1 публикация в издании, рекомендуемом ВАК; 1 статья в научном журнале, индексируемом SCOPUS и Web of Science; 3 статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК; тезисы к 9 докладам на всероссийских и международных научно-технических конференциях; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 98 наименований. Основной текст изложен на 157 страницах машинописного текста. Работа содержит 82 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, отмечены научная новизна, а также приведены научные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** «Интегральные оптические микроволноводы и структуры на их основе» представляет литературный обзор по теме диссертации. В первом параграфе дано краткое описание существующих методов расчета дисперсионных характеристик оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения. Отдельное внимание уделено методу приближенного модового анализа, предложенному Меноном и соавторами [1]. Приведены



основные выражения, описывающие дисперсию прямоугольного диэлектрического микроволновода. Также приведено сравнение результатов расчета дисперсии микроволновода по методу Менона [1] с методами циркулярных гармоник [2] и Маркатилли [3].

Второй параграф посвящен потерям в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Рассмотрены основные виды потерь в таких микроволноводах. Показано, что наиболее широко исследованы потери, обусловленные рассеиванием на поверхностных неоднородностях на границе раздела сред, а также излучением на изгибе волновода. Приведены методы снижения потерь, обусловленных рассеиванием на поверхностных неоднородностях на границе раздела сред.

Третий параграф содержит обзор исследований, посвящённых связанным интегральным микроволноводным структурам. Показано, что исследование связанных оптических структур обычно производится экспериментальным образом, методами численного моделирования в различных программных пакетах и путем расчета по теории связанных мод. Приведено краткое описание существующих формулировок теории связанных мод. Показано, что для расчета характеристик передачи связанных оптических микроволноводов используются так называемые *обычная теория связанных мод* и *модифицированная теория связанных мод*. Объяснено, что обе эти теории не применимы для определения характеристик передачи сильно связанных микроволноводов. Установлено, что модифицированная теория связанных мод с введением эффективных источников возбуждения в терминах ортогональных дополнительных полей, присущих теории Фелсена-Маркувица-Барыбина (ФМБ), для моделирования связи оптических микроволноводов не применялась.

Четвертый параграф посвящен краткому описанию структур на связанных оптических интегральных кольцевых резонаторах. Рассмотрены частные примеры использования типовых последовательных соединений оптических кольцевых резонаторов для обработки сигнала СВЧ-диапазона. Подробно рассмотрены варианты использования структуры, состоящей из микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором, для фильтрации СВЧ-сигнала.

Обзор состояния исследований в области интегральной оптики и интегральной радиофотоники показал, что в момент начала работы над диссертацией существовал большой интерес к интегральным оптическим микроволноводам и структурам на их основе. В то же время некоторые важные задачи, связанные с распространением электромагнитных волн в таких

структурах, оставались мало изученными. В частности, были мало исследованы потери распространяющихся мод, обусловленные собственными потерями материалов структуры. Отсутствовала строгая аналитическая теория, описывающая характеристики передачи связанных интегральных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения. Были мало изучены типовые последовательные соединения интегральных кольцевых резонаторов с учетом связи с подводящим и отводящим микроволноводами, а также их применение для фильтрации СВЧ-сигнала.

Глава 2 «Исследование регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного сечения» посвящена разработке аналитической теории оптических потерь прямоугольного микроволновода, обусловленных собственными потерями материалов, проверке полученных аналитических результатов и исследованию влияния геометрических и материальных параметров микроволновода на вносимые потери.

В первом параграфе главы разработана аналитическая теория оптических потерь в прямоугольном диэлектрическом микроволноводе. Аналитическая теория строится на совместном решении уравнений Максвелла и материальных уравнений и учитывает собственные потери материалов микроволновода и окружающего пространства путем введения в материальные уравнения комплексных диэлектрических проницаемостей сред.

Во втором параграфе исследованы особенности формирования собственных потерь в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Произведен анализ влияния геометрических и материальных параметров диэлектрического прямоугольного микроволновода на дисперсионные свойства и собственные потери двух основных мод ортогональной поляризации. Показано, что в формировании зависимости частотной характеристики декремента затухания участвуют два процесса: перераспределение энергии в системе волновод-окружающая среда и дисперсия групповой скорости. При этом с увеличением частоты оптического излучения за счет перераспределения энергии в системе волновод-окружающая среда волна сосредотачивается в волноводе, вследствие чего потери стремятся от значения декремента затухания материала, окружающего волновод, к декременту затухания материала волновода. Дисперсия групповой скорости, обусловленная геометрией волноведущей системы, приводит к образованию локального максимума декремента затухания на частотной характеристике, а увеличение разницы показателей преломления системы волновод-окружающая среда или размеров поперечного сечения волновода ведет к увеличению значения данного

максимума и его сдвигу вниз по частоте. Показано, что путем подбора параметров волноведущей структуры возможна реализация случая, когда потери  $E_x^{11}$ -моды много меньше потерь  $E_y^{11}$ -моды. Приведены выведенные аппроксимационные формулы, описывающие потери в интегральных оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Формулы справедливы для микроволноводов высотой от 300 до 900 нм, имеющих ширину более 1 мкм при контрасте показателей преломления от 0,36 до 2,76. Максимальная погрешность расчетов по аппроксимационным формулам не превышает 5,6% в сравнении с численным моделированием по аналитической теории.

Третий параграф данной главы посвящен экспериментальному исследованию диэлектрических микроволноводных структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>. Параграф состоит из трех пунктов. В первом пункте описана методика измерений интегральных оптических структур на измерительной установке, состоящей из перестраиваемого лазера (PPCL-300 Pure Photonics), контроллера поляризации, излучающего и принимающего линзированных оптических волокон, исследуемой структуры и оптического измерителя мощности.

Во втором пункте представлены результаты экспериментального исследования структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> с микроволноводами шириной 1 мкм, 1,5 мкм и 2 мкм различной длины. Для ввода и вывода оптического излучения на концах микроволноводов располагались дифракционные решетки. Проведена оценка собственных потерь микроволноводов различной ширины, а также значение потерь на ввод и вывод оптического излучения. Исследована зависимость выходной мощности от частоты излучающего лазера.

В третьем пункте проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных. Показано, что разработанная теория пригодна как для теоретического моделирования свойств оптических волноводов, так и для исследования качества материалов, входящих в состав оптической интегральной структуры.

Глава 3 «Исследование связи оптических регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения» посвящена разработке аналитической теории связанных мод для многоволноводных систем, состоящих из прямоугольных диэлектрических микроволноводов, а также исследованию влияния геометрических и материальных параметров на характеристики передачи таких систем.

В первом параграфе главы разработана аналитическая теория связи регулярных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного

поперечного сечения. Эта теория опирается на теорию потерь в прямоугольном диэлектрическом микроволноводе, разработанную в Главе 2. Решения теории потерь используются как элементы разложения по собственным модам прямоугольного микроволновода с последующим применением к ним модифицированной теории связанных мод ФМБ.

Во втором параграфе исследован частный случай двух регулярных диэлектрических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения в рамках разработанной теории связи. В результате получена система уравнений для волновых амплитуд двух связанных диэлектрических микроволноводов.

Третий параграф посвящен исследованию характеристик передачи недиссипативной системы, состоящей из двух регулярных идентичных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения. Параграф состоит из трех пунктов.

В первом пункте рассмотрено влияние расстояния между микроволноводами на характеристики передачи недиссипативной системы, состоящей из двух регулярных идентичных оптических микроволноводов. Показано, что с увеличением расстояния между микроволноводами, за счет уменьшения интеграла перекрытия мод, увеличивается длина переизлучения, т.е. области связи, при которой вся мощность переизлучается из одного волновода в другой. Показано также, что учет эффективных поверхностных источников приводит к уменьшению длины переизлучения. Проанализировано влияние геометрических параметров системы на значения модулей нормированных коэффициентов связи. Обнаружено, что отношение поверхностной и объемной частей коэффициентов связи при выбранных геометрических размерах поперечного сечения и материальных параметрах системы, состоящей из двух связанных идентичных микроволноводов, есть константа, не зависящая от расстояния между микроволноводами.

Во втором пункте исследовано влияние контраста показателей преломления на характеристики передачи недиссипативной системы, состоящей из двух идентичных регулярных оптических микроволноводов. Показано, что с увеличением контраста показателей преломления системы увеличивается значение длины переизлучения (см. рисунок 1). Обнаружено, что зависимость длины переизлучения от контраста показателей преломления имеет выраженный локальный минимум, обусловленный влиянием двух конкурирующих процессов – групповой скоростью и интегралом перекрытия распространяющихся мод. Продемонстрировано, что уменьшение размеров поперечного сечения волноводов приводит к сдвигу характеристики длины

переизлучения, построенной в зависимости от контраста показателей преломления, в область меньших значений длин переизлучения (см. рисунок 1(а)), а уменьшение расстояния между волноводами уменьшает крутизну нарастания характеристики (см. рисунок 1(а)). Продемонстрировано также, что уменьшение любого из размеров двухволноводной системы приводит к сдвигу локального минимума в область больших значений контраста показателей преломления с одновременным увеличением его глубины. Исследовано влияние контраста показателей преломления на значения модулей нормированных коэффициентов связи. Показано, что с увеличением контраста показателей преломления значения нормированных коэффициентов связи уменьшаются; при этом на характеристиках присутствует локальный максимум, обусловленный конкуренцией между дисперсией групповой скорости и интегралом перекрытия полей.

Третий пункт посвящен исследованию передаточных характеристик оптического направленного ответвителя, построенного на идентичных микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, подтверждающее адекватность разработанной аналитической теории связи оптических микроволноводов.

Четвертый параграф посвящен исследованию влияния неидентичности микроволноводов на характеристики передачи связанных волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения. Продемонстрировано, что нарушение идентичности волноводов приводит к нарушению перестановочной симметрии коэффициентов связи и тем самым к уменьшению величины коэффициента передачи мощности между волноводами и появлению кросс-мощности, передаваемой системой.

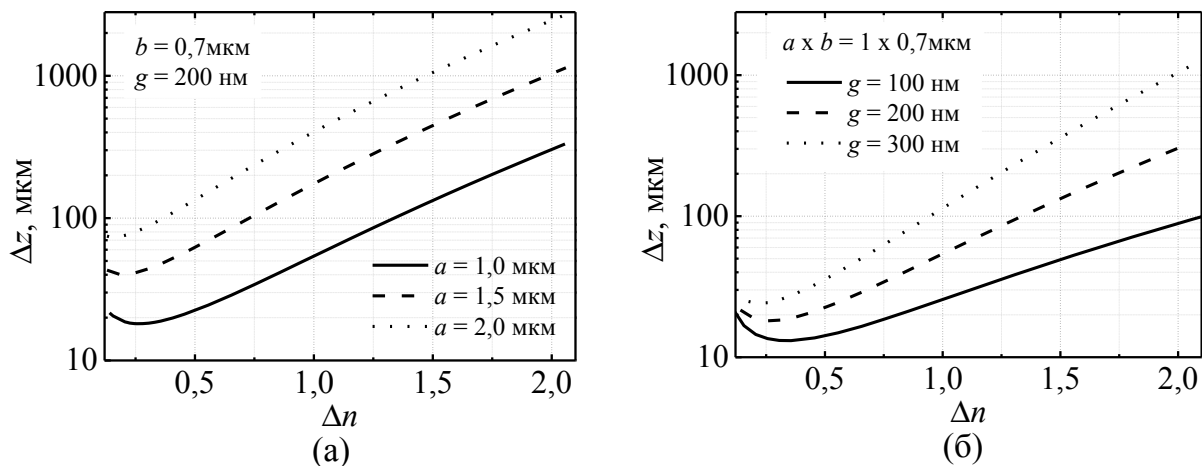


Рисунок 1 – Зависимость длины переизлучения от контраста показателей преломления при различных значениях ширины микроволовода (а) и при различных значениях расстояния между волноводами (б)

Глава 4 «Исследование характеристик передачи интегральных кольцевых резонаторов» посвящена исследованию непараллельных диэлектрических волноведущих структур прямоугольного поперечного сечения, а также разработке аналитической теории, описывающей характеристики передачи типовых многокольцевых структур. Кроме того, в главе приведено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик передачи оптических кольцевых резонаторов и исследованы характеристики передачи таких резонаторов для фильтрации СВЧ-сигнала.

В первом параграфе главы теория связанных мод применена для анализа непараллельных диэлектрических волноведущих структур в рамках адиабатического приближения. При этом компоненты электрического и магнитного радиально искривленного волновода выражались через компоненты невозмущенного волновода, а радиус кривизны микроволновода был принят много большим длины волны оптического излучения в микроволноводе.

Во втором параграфе главы описана общая теория формирования характеристик передачи типовых структур оптических кольцевых резонаторов. Теория построена на методе парциальных волн и учитывает коэффициенты связи резонаторов с подводящей и отводящей линиями связи.

Третий параграф посвящен исследованию влияния параметров области связи на характеристики передачи оптического микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором. Показано, что путем выбора геометрических и материальных параметров возможна реализация различных режимов работы такой волноведущей структуры. Продемонстрировано, что незначительные вариации как расстояния между микроволноводом и кольцевым резонатором, так и значения декремента затухания волноводов вносят существенный вклад в итоговое значение коэффициента передачи.

Четвертый параграф посвящен экспериментальному исследованию интегральных кольцевых резонаторов, построенных на диэлектрических волноведущих структурах  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ . Кроме того, в параграфе продемонстрировано качественное и количественное совпадение хода амплитудно-частотных характеристик для нагруженного резонатора, полученных экспериментальным и теоретическим путем.

Пятый параграф посвящен применению кольцевых резонаторов для фильтрации радиосигнала. Параграф состоит из трех пунктов.

В первом пункте приведена топология базовой кольцевой структуры, а также ее основные геометрические и материальные параметры.

Во втором пункте исследованы характеристики передачи такой структуры в оптическом диапазоне частот. Путем сопоставления результатов расчета и экспериментальных данных произведена оценка потерь на распространение волн в оптических микроволноводах.

В третьем параграфе исследованы характеристики передачи кольцевой структуры в СВЧ-диапазоне. Рассмотрено влияние уровня подавления низкочастотной гармоники фазомодулированного оптического сигнала на значение коэффициента передачи СВЧ-сигнала на выходе фотодетектора. Показано, путем контроля уровня подавления низкочастотной гармоники фазомодулированного оптического сигнала возможна реализация двух режимов работы микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором – в качестве полосно-заграждающего и полосно-пропускающего фильтров.

В Заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе:

1. Разработана аналитическая теория оптических потерь прямоугольного микроволновода, обусловленных собственными потерями материалов его диэлектрической волноведущей структуры.
2. Произведен анализ влияния геометрических и материальных параметров диэлектрического прямоугольного микроволновода на дисперсионные свойства и собственные потери двух основных мод ортогональной поляризации.
3. Получены аппроксимационные формулы, характеризующие потери в интегральных оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения. Формулы справедливы для микроволноводов высотой от 300 до 900 нм, имеющих ширину более 1 мкм, при  $\Delta n$  от 0,36 до 2,76. Максимальная погрешность расчетов по аппроксимационным формулам не превышает 5,6% по сравнению с численным моделированием по аналитической теории.
4. Разработана аналитическая теория связи диэлектрических волноведущих структур, состоящих из многих регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
5. Разработана аналитическая теория связи двух регулярных диэлектрических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.
6. Численно исследованы характеристики передачи недиссипативной системы, состоящей из двух регулярных микроволноводов прямоугольного поперечного сечения.

7. Исследованы характеристики передачи кольцевых резонаторов на оптических микроволноводах и их использование для фильтрации радиосигнала.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № 16.1750.2017/4.6 и проекта ФЦП № 14.575.21.0157.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS и Web Of Science и рекомендуемых ВАК:

- [1] Klestova, A. Inkjet Printing of Optical Waveguides for Single-Mode Operation / A. Klestova [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2019. – Vol. 7. – №. 2. – P. 18011
- [2] Чеплагин, Н. А. Аналитическая теория дисперсии оптических волн регулярных микроволноводов / Н. А. Чеплагин, Г. А. Зарецкая, Б. А. Калиникос // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – 2018. – №. 3. – С. 71-78.

Охранные документы интеллектуальной собственности:

- [3] Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2019615098, Российская Федерация. Программа для исследования собственных потерь в интегральных оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения (LossWg) / Г.А. Зарецкая, М.А. Черкасский, А.В. Дроздовский, Б.А. Калиникос, А.В. Кондрашов; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – №2019613670; заяв. 08.03.2019; зарегистр. 18.03.2019.
- [4] Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2019615894, Российская Федерация. Программа для исследования волновых процессов в связанных оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения (CMTRWg) / Г.А. Зарецкая, М.А. Черкасский, А.В. Дроздовский, Б.А. Калиникос, А.В. Кондрашов; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – №2019614164; заяв. 16.04.201; зарегистр. 14.05.2019

Другие статьи и материалы международных и всероссийских конференций:

- [5] Zaretskaya, G. A. An influence of the coupling region geometry on the transmission characteristics of the optical ring resonators / G. A. Zaretskaya, A. V. Drozdovskii, B. A. Kalinikos // *Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy*. – 2019. – P. 538.
- [6] Zaretskaya, G. A. The influence of the refractive index contrast on the transmission characteristics of a structure consisting of two identical optical microwaveguides of



- rectangular cross-section / G. A. Zaretskaya, A. V. Drozdovskii, B. A. Kalinikos // *Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy.* – 2019. – P. 2022.
- [7] Zaretskaya, G. A. The losses in the optical microwavguides of rectangular cross section / G. A. Zaretskaya, A. V. Drozdovskii, B. A. Kalinikos // *Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Rome, Italy.* – 2019. – P. 2293.
- [8] Зарецкая Г.А. Влияние контраста показателей преломления на характеристики передачи системы, состоящей из двух связанных оптических микроволноводов / Г. А. Зарецкая, А. В. Дроздовский // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2019 г. – Т.1. №. 1. – С. 448-452.
- [9] Зарецкая Г.А. Исследование собственных потерь оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения / Г. А. Зарецкая, А. В. Дроздовский // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2019 г. – Т.1. – №. 1. – С. 224-228.
- [10] Дроздовский А.В. Исследование влияния геометрических и физических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения / А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая // *Материалы V международной конференции: Информационные технологии и нанотехнологии, Самара, Россия.* – 2019. – С. 218-222.
- [11] Зарецкая, Г.А. Влияние контраста показателей преломления на характеристики передачи недиссипативной системы, состоящей из двух идентичных оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения / Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский // *Материалы V международной конференции: Информационные технологии и нанотехнологии, Самара, Россия.* – 2019, – С. 212-217.
- [12] Зарецкая, Г.А. Определение свойств материалов оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения / Г.А. Зарецкая, М.И. Мартынов, А.В. Дроздовский // *Материалы международной конференции: Аморфные и микрокристаллические полупроводники, СПб, Россия.* – 2018. – С. 234-235.
- [13] Дроздовский, А.В. Исследование планарных волноведущих структур на основе нитрида кремния / А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, А.В. Кондрашов, М.И. Мартынов, А.А. Никитин // *Материалы международной конференции: Аморфные и микрокристаллические полупроводники, СПб, Россия.* – 2018. – С. 183-184.
- [14] Шапран, Д.А. Взаимосвязь потерь на распространение с геометрическими параметрами оптических микроволноводов / Д. А. Шапран, Г. А. Зарецкая, А. В. Дроздовский // *Материалы международной молодежной конференции: Физика.СПб, СПб, Россия.* – 2018. – С. 175-176.
- [15] Шапран, Д.А. Влияние геометрических параметров на собственные потери в оптических микроволноводах прямоугольного поперечного сечения / Д.А. Шапран, Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2018. – Т.1. – №.1. – С. 530-533.

- [16] Шапран, Д.А. Взаимосвязь потерь на распространение с геометрическими параметрами оптических микроволноводов / Д.А. Шапран, Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский. // Материалы VI Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, СПб, Россия. – 2018. – С. 524-526.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ БЛИЗКОЙ К ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- [1] Zaretskaya, G. A. Eigen-frequencies of whispering gallery modes of disk dielectric resonators: a dimensional quantization method / G. A. Zaretskaya [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. – 2018. – Vol. 1038. – №. 1. – P. 012099.
- [2] Зарецкая, Г.А. Метод расчета собственных резонансных частот оптических резонаторов с модами шепчущей галереи / Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский, Б.А. Калиникос // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – № 1. С. 56-62.
- [3] Дроздовский, А.В. Излучательные потери скругленных оптических микроволноводов / А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, Д.Д. Кремнев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т.1. – №.1. – С. 445-447.
- [4] Дроздовский, А.В. Высокодобротный радиофотонный СВЧ фильтр с магнитной перестройкой / А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, Б.А. Калиникос, Ю.Ю. Рогальская // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т.1. – №.1. – С. 539-542.
- [5] Дроздовский, А.В. Проверка пригодности пакета Ansys HFSS для моделирования планарных оптических элементов / А.В. Дроздовский, А.И. Новиков, Г.А. Зарецкая // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – №.1. – С. 539-542.
- [6] Дроздовский, А.В. Перестраиваемый высокодобротный радиофотонный СВЧ фильтр / А.В. Дроздовский, Г. А. Зарецкая, В. В. Витько, Ю. Ю. Рогальская // Материалы международной молодежной конференции ФизикА.СПб, СПб, Россия. – 2017. – С. 336-337.
- [7] Зарецкая, Г.А. Метод расчета собственных азимутальных колебаний дисковых диэлектрических резонаторов / Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский, Б.А. Калиникос // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – №.1. – С. 597-601.
- [8] Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2019615801, Российская Федерация. Программа для исследования генерации сигналов в сверхмалошумящих перестраиваемых спин-волновых радиофотонных СВЧ генераторов (DoubSolitonAE) / Г.А. Зарецкая, М.А. Черкасский, А.В.

Дроздовский, Б.А. Калиникос, А.В. Кондрашов; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – №2019614437; заяв. 22.04.2019; зарегистр. 08.05.2019.

- [9] Патент на полезную модель № 186801, Российская Федерация. Радиофотонный СВЧ фильтр / А.В. Дроздовский, В.В. Витько, А.А. Никитин, А.Б. Устинов, Г.А. Зарецкая, Б.А. Калиникос; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 2018133786; заяв. 24.09.2018; зарегистр. 04.02.2019.
- [10] Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2018660219, Российская Федерация. Программа для исследования волновых процессов в сверхмалошумящих перестраиваемых спин-волновых радиофотонных СВЧ генераторов гигагерцового диапазона частот (MWPSolSeparate) / М.А. Черкасский, А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, А.А. Никитин, Б.А.Калиникос; заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – №2018617035; заяв. 06.07.2018; зарегистр. 22.08.2018.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Menon, V. J. The rectangular dielectric waveguide revisited / V. J. Menon, S. Bhattacharjee, K. K. Dey // Optics communications. – 1991. – Vol. 85. – №. 5-6. – P. 393-396.
- [2] Goell, J. E. A circular-harmonic computer analysis of rectangular dielectric waveguides / J. E. Goell // Bell System Technical Journal. – 1969. – Vol. 48. – №. 7. – P. 2133-2160.
- [3] Marcatili E. A. J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics / E. A. J. Marcatili //Bell System Technical Journal. – 1969. – Vol. 48. – №. 7. – P. 2071-2102.