

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Боровковой Ольги Владимировны на диссертацию

Москалева Дмитрия Николаевича

на тему: «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность

Тонкопленочный ниобат лития привлекает внимание ученых и инженеров благодаря своим уникальным свойствам. Это видно по росту числа научных публикаций, посвященных данному материалу, расширению его использования в различных устройствах, в том числе и доступных коммерчески. Востребованность и интерес к тонкопленочному ниобату лития связан в первую очередь с его применением в фотонных интегральных схемах, которые находят применение в различных датчиках и сенсорах, устройствах оптической метрологии, элементах для квантовых вычислений, аппаратных ускорителях для нейронных сетей, а также в других областях науки и техники. Одним из важнейших элементов, входящим в состав фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития, является кольцевой резонатор, который может служить в качестве оптического фильтра. Первостепенной характеристикой любого оптического фильтра выступает его полоса пропускания и отражения, поэтому ее расчет является ключевой задачей с точки зрения изготовления и использования данного элемента. Обычно при моделировании процесса распространения излучения в кольцевых резонаторах на основе тонкопленочного ниобата лития применяются трехмерные сеточные методы, зачастую требующие внушительных вычислительных ресурсов. Однако, при изготовлении фотонных интегральных схем требуется выполнение десятков итераций моделирования для поиска необходимых параметров, поэтому применение классических трехмерных сеточных методов не всегда является оптимальным решением. Все это подтверждает высокую актуальность тематики работы Д.Н. Москалева, которая посвящена разработке модели анизотропного кольцевого резонатора и соответствующего метода расчета его оптического спектра.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в разработке метода моделирования процесса распространения излучения в анизотропном кольцевом резонаторе с учетом оптической анизотропии материала. В рамках разработанного метода кольцевой резонатор рассматривается как совокупность отдельных оптически связанных элементов кольцевого резонатора: делителя оптической мощности, прямого и кольцевого волноводов. На основе матричного представления отдельных элементов строится математическая модель анизотропного кольцевого резонатора, то есть его передаточная функция. Для вычисления множителей, входящих в передаточную функцию анизотропного кольцевого резонатора,

автором диссертации были адаптированы теория связанных мод для расчета межмодовой связи в кольцевом волноводе, а также метод модового согласования для моделирования процесса распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях.

Практическая значимость работы заключается в демонстрации применимости метода эффективного показателя преломления для вычисления оптических параметров фундаментальных мод канальных волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития, а также разработке соответствующих программ для ЭВМ. В частности, в автореферате приведены ссылки на свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Ко всему прочему, приведенные в диссертационной работе результаты расчетов для канальных волноводов и многомодовых интерференционных делителей могут быть использованы при изготовлении фотонных интегральных схем. Отдельно необходимо отметить, что ряд разработанных программных модулей были встроены в комплексное программное обеспечение для моделирования и проектирования фотонных интегральных схем Difra, что подтверждается приведенным в тексте диссертации актом внедрения. Это важно, так как развитие отечественных инженерных программных продуктов является на сегодняшний день одной из важнейших задач ввиду санкционных ограничений на приобретение зарубежного программного обеспечения, а также стратегии РФ на его импортозамещение.

Научная новизна

Научная новизна работы Д.Н. Москалева заключается:

- 1) в разработке математической модели анизотропного кольцевого резонатора и соответствующего метода расчета оптического спектра резонатора;
- 2) в разработке методики моделирования процесса распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях, построенной на основе предложенной математической модели, позволяющей аналитически вычислять коэффициенты разложения в методе модового согласования;
- 3) в определении вида зависимостей коэффициентов связи фундаментальных мод в изогнутых волноводах из тонкопленочного ниобата лития X-среза.
- 4) в оценке диапазона геометрических параметров поперечного сечения волноводов из тонкопленочного ниобата лития X-среза, в рамках которого справедливо применять метод эффективного показателя преломления для расчета параметров мод волновода.

Краткая характеристика основного содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированной литературы, включающая 149 наименований, общий объем работы 146 страниц, включая 67 рисунков, 1 таблицу, 1 приложение.

Во введении показана актуальность темы исследования, приведены цель работы, ее научная новизна, практическая значимость и дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена описанию технологий интегральной фотоники и областей их применения, обсуждению особенностей фотонных интегральных схем на основе

тонокопленочного ниобата лития. Также в главе подробно рассматриваются существующие методы прямого и схемотехнического моделирования элементов фотонных интегральных схем, в том числе и анизотропных кольцевых резонаторов.

Во второй главе дается краткое описание разработанного метода моделирования на основе метода конечных разностей в частотной области и метода эффективного показателя преломления, которые использовались для моделирования канальных оптических волноводов. Приводятся результаты расчетов оптических свойств канальных волноводов на основе Х-среза тонкопленочного ниобата лития волноводов, дается оценка применимости метода эффективного показателя преломления.

Третья глава посвящена анализу оптических делителей мощности с помощью численного моделирования. В главе исследуются направленные ответвители и многомодовые интерференционные делители, в том числе приводятся результаты моделирования распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе. Для полноты картины следовало бы привести результаты подобного моделирования для направленных ответвителей, несмотря на то, что в тексте оговаривается причина, почему данное моделирование не выполнялось. Далее в главе следует описание построения математической модели многомодового интерференционного делителя и методики моделирования процесса распространения излучения в нем.

В четвертой главе рассматриваются две задачи: моделирование оптических характеристик изогнутого волновода с целью определения зависимости оптических потерь от радиуса изгиба волновода; моделирование процесса межмодового взаимодействия фундаментальных мод в изогнутых волноводах вследствие влияния анизотропии на распространение излучения.

Пятая глава посвящена построению математической модели анизотропного кольцевого резонатора, на основе которой разрабатывается метод для расчета спектра резонатора. Приводятся результаты сравнения разработанной модели и метода с данными, полученными другими авторами, показывающие хорошую количественную согласованность экспериментальных результатов с результатами, полученными с помощью разработанной модели вне области гибридизации и значительное несоответствие внутри области гибридизации. Полученное несоответствие результатов в области гибридизации объясняется влиянием геометрической фазы на процесс распространения излучения в резонаторе.

В заключении представлены основные результаты и сделаны выводы.

Замечания по диссертационной работе

1) В разделе 1.1 диссертации указано, что «появление тонкопленочного ниобата лития стало настоящим прорывом», имеется в виду для изготовления сложных элементов фотонных интегральных схем. Не лишним было бы сказать несколько слов о технологии производства именно тонкопленочного ниобата лития и привести ссылки на соответствующие работы и статьи, так как именно ТНЛ посвящена диссертация. При этом технология производства монокристалла ниобата лития обсуждается в том же разделе.

- 2) В разделе 2.5.1 приводятся рисунки 22 и 23а. Получены ли они автором диссертации? Кажется, что нет. Если так, то отсутствуют ссылки, откуда взяты данные рисунки.
- 3) В разделе 3.3.1 диссертации говорится, что в разложении напряженностей электрического и магнитного полей (Уравнение 3.12) справедливо отбрасывать радиационные моды и моды, распространяющиеся назад, при этом автор ссылается на работу Soldano L. B., Pennings E. C. M. Однако в цитируемом исследовании рассматриваются делители на основе InP. Будет ли справедливым сделанное приближение, если рассматривать высококонтрастные волноводы, например, из кремния или нитрида кремния?
- 4) В четвертой главе приводятся результаты моделирования межмодовой связи для волновода с радиусом изгиба 50 мкм. Из текста диссертации не совсем ясно, почему выбран такой радиус и как изменится результат, если радиус сделать меньше или больше. Более того, интегральные высокодобротные резонаторы чаще всего делают именно гораздо большего радиуса, поэтому этот аспект представляется особенно важным для дальнейших исследований.
- 5) В ходе построения математической модели анизотропного резонатора в разделе 5.1 «Вывод уравнений передаточной функции кольцевого резонатора» делается ряд упрощений. Часть из них обосновывается в предыдущих главах диссертации, однако, неясно, на чем основано первое приближение об отсутствии межмодовой перекачки в делителе мощности.
- 6) В рамках диссертации приводятся результаты проектирования и моделирования прямых и изогнутых волноводов, делителей мощности с целью их последующего изготовления на конкретном производстве, однако для кольцевых резонаторов подобных результатов не получено (приводятся только результаты проверки разработанного метода и модели).
- 7) К незначительным недочетам диссертационной работы относятся: присутствие в тексте досадных опечаток; использование иностранных обозначений, например, FSR, хотя есть русский научный термин «межмодовое расстояние»; в диссертации подрисунки обозначены то латинскими буквами (например, рисунок 12 в Главе 2, рисунки 65 и 66 в Главе 5), то русскими буквами (например, рисунок 11 в Главе 2); в разделе 2.2 перепутаны ссылки на рисунки 12а и 12b при их описании на странице 42.

Заключение

Приведенные замечания не снижают ценность работы и не влияют на ее положительную оценку. Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации. Диссертация Москалева Дмитрия Николаевича «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в процессе выполнения которой соискатель проявил глубокие знания предмета исследования, соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и требованиям пп.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации

от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Москалев Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук (1.3.6 – Оптика),
старший научный сотрудник группы Квантовой оптики, Общество с ограниченной
ответственностью «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»

«03» апреля 2025 года / 11 / Боровкова О.В.

Общество с ограниченной ответственностью «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», г.Москва, вн-тер.г. Муниципальный округ Можайский, б-р Большой, д.30, стр. 1

Подпись Боровковой О.В. Верна.

Верный Н.А. секретарь

Славковская

04.04

