

О Т З Ы В

официального оппонента доктора физико-математических наук Злоказова Евгения Юрьевича на диссертацию Москалева Дмитрия Николаевича на тему: «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность

Современные проблемы информационных технологий требуют создание энергоэффективных и сверхпроизводительных устройств передачи, обработки и хранения данных. В связи с этим, оптоэлектронные системы на основе фотонных интегральных схем вызывают особый интерес благодаря сверхшироким полосам модуляции оптических сигналов и низкому энергопотреблению, а также высокому уровню интеграции технологий создания элементов фотонных интегральных схем с технологиями кремниевой микроэлектроники. Важной задачей при разработке современных оптоэлектронных систем является математическое моделирование. Размеры элементов фотонных интегральных схем сопоставимы, а зачастую меньше длины волны распространяющегося в них излучения. Это требует прямого решения уравнений Максвелла, что в случае моделирования сложных многокомпонентных элементов, таких как кольцевой резонатор, является крайне вычислительно ёмкой задачей. Кроме того, задача усложняется, когда моделирование выполняется для элементов, изготовленных на основе анизотропных материалов, например, на основе тонкопленочного ниобата лития, который широко используется при создании высокочастотных электрооптических модуляторов, различных датчиков и устройств нелинейной фотоники. Поэтому диссертационное исследование Д.Н. Москалева, посвященное разработке математической модели анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития, несомненно является актуальным.

Теоретическая значимость диссертационной работы Д.Н. Москалева заключается в том, что в ней предложен новый метод расчета спектра анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития. Данный метод предполагает последовательное моделирование распространения излучения в элементах, составляющих кольцевой резонатор: прямом волноводе, оптическом делителе мощности и в кольцевом волноводе. После чего полученные результаты используются в математической модели резонатора для расчета его спектра. Такое поэтапное моделирование позволяет оперативно исследовать процессы распространения излучения и оценить, как различные факторы влияют на спектр резонатора, что может помочь при проектировании и создании устройств нелинейной и квантовой оптики.

Практическая значимость работы заключается в проектировании поперечного сечения волноводов, эффективно поддерживающих одномодовый режим распространения излучения и топологии многомодовых интерференционных делителей из тонкопленочного ниобата лития. Также практическую значимость работы составляют предложенная методика расчета S-параметров многомодовых интерференционных делителей и программные модули для моделирования элементов фотонных интегральных схем, которые были внедрены в российское программное обеспечение Difra.

Научная новизна работы Д.Н. Москалева заключается в следующем:

- 1) в оценке диапазона геометрических параметров поперечного сечения волноводов из тонкопленочного ниобата лития X-среза в рамках которого справедливо применение метода эффективного показателя преломления для расчета параметров мод волновода;
- 2) в разработке методики моделирования процесса распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях произвольной конфигурации, основанной на принципах метода распространения пучка в совокупности с методом эффективного показателя преломления, позволившей определить параметры конфигурации и аналитически вычислить коэффициенты матриц передачи делителей;
- 3) в разработке методики моделирования анизотропного изогнутого волновода на основе теории связанных мод, позволившей определить вид зависимостей коэффициентов связи фундаментальных мод в изогнутых волноводах из тонкопленочного ниобата лития X-среза, а также исследовать диапазон гибридизации мод;
- 4) в разработке и обосновании методики схематического моделирования анизотропного кольцевого резонатора, позволившей произвести расчет параметров оптического поля на выходе резонатора с заданными параметрами и оценить его спектр пропускания.

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 выбранной темы исследования, степень разработанности темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи. Включены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе описаны области применения фотонных интегральных схем, приведены характеристики объемного и тонкопленочного ниобата лития. В главе представлено описание кольцевых резонаторов на основе тонкопленочного ниобата лития и выполнен

критический анализ существующих методов их моделирования с обоснованием преимуществ и недостатков каждого метода.

Во второй главе приводится обоснование выбора и описание используемого в работе метода конечных разностей в частотной области. Показаны результаты расчетов оптических свойств канальных волноводов на основе Х-среза тонкопленочного ниобата лития. Также в главе исследуется применимость метода эффективного показателя преломления для моделирования волноводов. Результаты сравнительного анализа двух методов позволили определить диапазон геометрических параметров поперечного сечения волноводов в рамках которого возможно применение метода эффективного показателя преломления. Сделаны оценки зависимости потерь от шероховатости боковой стенки волновода, что особенно важно при практической реализации устройств интегральной фотоники.

В третьей главе приводится описание используемого в работе метода распространяющегося пучка на основе метода эффективного показателя преломления. Показаны результаты моделирования оптических свойств делителей мощности. В главе подробно рассмотрено построение математической модели многомодового интерференционного делителя и методики моделирования процесса распространения излучения в нем. Приводится сравнение результатов моделирования, полученных с помощью разработанной модели и классического решения методом распространяющегося пучка.

В четвертой главе рассматриваются две задачи: моделирование оптических характеристик изогнутого волновода с целью определения зависимости оптических потерь от радиуса изгиба волновода, а также моделирование процесса перекачки мощности между фундаментальными модами в изогнутых волноводах вследствие влияния анизотропии на распространение излучения. В главе показаны виды зависимости коэффициентов связи от длины волны, угла наклона боковой стенки и материала покровного слоя, а также выполнен расчет процесса распространения излучения в кольцевом волноводе.

В пятой главе разрабатывается метод расчета спектра пропускания анизотропного кольцевого резонатора, для чего была построена его математическая модель, включающая результаты предыдущих глав диссертации, в которых рассматриваются составляющие элементы резонатора: прямой волновод, делитель мощности, кольцевой волновод. Показаны результаты расчета спектра кольцевого резонатора, представленного в статье А.Пана, выполнена проверка точности результатов, полученных с помощью разработанной модели, в сравнении с экспериментальными данными. Валидация модели показала, что вне области гибридизации мод ошибка в значениях свободного спектрального диапазона не превышает 6%. Внутри области гибридизации наблюдается уменьшение свободного спектрального

диапазона в два раза. Обнаруженная особенность поведения спектра резонатора представляет ценность и интерес для дальнейших исследований.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы и сделаны общие выводы.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

Публикации. По тематике диссертационного исследования опубликовано 21 печатная работа, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, 16 работ в других изданиях; получено 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе

- 1) Разработанные и исследованные методики математического моделирования элементов кольцевого резонатора, а также результаты, полученные с их помощью, не учитывают особенностей нелинейного взаимодействия световых пучков с материалом волноводов.
- 2) В тексте диссертации обосновано применение разработанных методик математического моделирования кольцевого резонатора для топологии, подразумевающей ввод излучения вдоль кристаллографической оси Y кристалла ниобата лития X -среза. Применимость данных методик, а также особенности распространения света в случаях отклонения топологии элементов кольцевого резонатора от выбранной ориентации кристаллофизических осей не исследована.
- 3) Результаты моделирования кольцевого резонатора, представленные в Главе 5, получены только для входного излучения с TE -поляризацией в силу особенностей работы интерференционного делителя. При этом результаты моделирования волноводов, представленные в Главах 2 и 4, демонстрируют преимущества использования TM -поляризованного излучения. В частности, низкие потери TM -моды при малых радиусах изгиба волновода, низкий коэффициент связи, а также высокая точность вычисления методом эффективного показателя преломления. Однако модели кольцевых резонаторов на основе TM -поляризованного излучения в работе соискателя не исследованы.
- 4) На рисунке 47(а) приводится зависимость оптических потерь TM -моды от радиуса изгиба волновода. Однако в тексте не представлено объяснений, почему при уменьшении радиуса изгиба потери сначала растут, а затем падают.

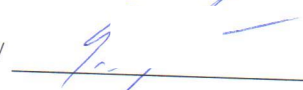
5) В оформлении диссертации присутствуют небрежности: орфографические и синтаксические ошибки; одновременное использование русскоязычных и англоязычных аббревиатур, например, КРЧО и FDFD; переменные из формул не расшифрованы в тексте; одинаковое обозначение различных величины, например P в формулах 2.5, 2.6, 4.6–4.7 и 4.9–4.13; степень поляризации где-то называется долей поляризации; в тексте присутствуют некорректные ссылки на формулы; легенда на Рис. 64(с) не соответствует содержанию и т.д.

Данные замечания не затрагивают значимости, достоверности и актуальности результатов, представленных в диссертационной работе Москалева Д.А., выполненной на высоком научно-техническом уровне

Заключение. Диссертация Москалева Дмитрия Николаевича на тему «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» соответствует паспорту специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, написана на актуальную тему, обладает научной новизной, практической и теоретической значимостью. Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация соответствует требованиям п.п.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Москалев Дмитрий Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ за разработку и обоснование методов оперативного численного моделирования фотонных интегральных схем на основе анизотропных кольцевых резонаторов.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.04.21 – Лазерная физика), профессор кафедры лазерной физики (№ 37) института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ

« 16 » апреля 2025 года /  / Злоказов Евгений Юрьевич
НИЯУ МИФИ, 115409, г.Москва, Каширское ш., д.31

e-mail: EYZlokazov@mephi.ru, Сл. тел.: +7 495 788 5699 доб. 9391

Подпись Злоказова Е.Ю. удостоверяю

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

