

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**
(ТУСУР)

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050

тел: (382 2) 510-530

факс: (382 2) 513-262, 526-365

e-mail: office@tusur.ru

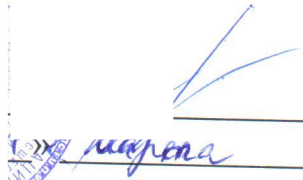
http:// www.tusur.ru

ОКПО 02069326, ОГРН 102700086706

ИНН 7021000043, КПП 701701001

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГАОУ ВО «Томский
государственный университет
систем управления и
радиоэлектроники», доктор
технических наук, профессор
Гевский Виктор Михайлович

 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» о диссертации **Москалева Дмитрия Николаевича** на тему **«Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационного исследования

Тонкопленочный ниобат лития благодаря своим особым свойствам становится ключевым материалом для изготовления фотонных интегральных схем. Одним из основных элементов фотонных интегральных схем на его основе является кольцевой резонатор, который находит широкое применение при разработке устройств в сенсорики, квантовых вычислениях и телекоммуникациях. Кольцевые резонаторы характеризуются спектрами пропускания и отражения, что позволяет использовать их в качестве оптического фильтра. На сегодняшний день для расчета спектров кольцевого резонатора из тонкопленочного ниобата лития в основном используются различные универсальные трехмерные методы моделирования, так как требуется учитывать влияние анизотропии кристалла ниобата лития на процесс распространения излучения. Однако существенным недостатком трехмерного моделирования в фотонике являются высокие требования к вычислительным ресурсам, а существующие более эффективные методы расчета спектра на основе матриц передачи не всегда применимы в случае резонаторов из анизотропных материалов.

Диссертация Москалева Д.Н. посвящена построению математической модели процесса распространения излучения в анизотропном кольцевом резонаторе и методу расчета его спектра пропускания, что представляет значительный научный и практический интерес и подтверждает актуальность темы.

Научная новизна работы

Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе Д.Н. Москалева, заключается в том, что:

- 1) предложена математическая модель, позволяющая моделировать многомодовый интерференционный делитель с произвольным числом входных и выходных волноводов без ограничения на количество распространяющихся мод;
- 2) получены результаты численного исследования характера взаимной перекачки мощности между модами в канальных волноводах на основе ТНЛ при изменении угла наклона боковой стенки и материала покровного слоя;
- 3) разработана математическая модель для расчета оптического спектра пропускания анизотропного кольцевого резонатора.

Практическая и теоретическая значимость работы

К главным пунктам практической значимости диссертационной работы можно отнести:

- 1) с помощью математического моделирования определены геометрические параметры поперечного сечения канальных волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития, соответствующие одномодовому режиму распространения излучения, с учетом технологических ограничений;
- 2) разработаны и внедрены программные модули для расчета оптических свойств прямых и изогнутых волноводов, делителей мощности и других элементов в российское программное обеспечение для моделирования и проектирования фотонных интегральных схем Difra.

К главным пунктам теоретической значимости диссертационной работы можно отнести:

- 1) разработан метод моделирования распространения излучения в анизотропном кольцевом резонаторе, учитывающий оптическую анизотропию материала резонатора;
- 2) определен вид зависимости коэффициентов связи фундаментальных мод изогнутого волновода с помощью теории связанных мод для анизотропных волноводов.

Также необходимо отметить, что используемое в диссертационной работе поэлементное рассмотрение кольцевого резонатора позволяет детально анализировать происходящие процессы при распространении излучения в элементах и отслеживать, как тот или иной фактор влияет на результирующий спектр пропускания резонатора.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Обоснованность полученных результатов подтверждается корректным применением известных положений физической оптики и электродинамики в рассматриваемых задачах. Достоверность разработанных моделей обеспечивается проверкой результатов методом конечных разностей в частотной области, методом распространяющегося пучка; достоверность численных расчетов подтверждается тем, что они выполнены для ряда

тестовых примеров с известными результатами и сходятся с известными экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Оценка содержания и оформления диссертации

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 приведено обоснование актуальности диссертационного исследования и дана общая характеристика работы.

Первая глава дает общую информацию об интегральной фотонике, о тонкопленочном ниобате лития и оптических кольцевых резонаторах. Также, в главе приводится подробный критический анализ подходов к моделированию кольцевых резонаторов и существующих методов моделирования кольцевых резонаторов, а также отдельных элементов, составляющих кольцевой резонатор.

Вторая глава посвящена моделированию и расчету оптических мод канальных волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития. Приводится краткое описание используемых методов. В рамках данной главы решается задача поиска параметров поперечного сечения, соответствующих одномодовому режиму распространения излучения с учетом технологических возможностей изготовления. Далее для этих волноводов оценивается диапазон геометрических параметров, внутри которого корректно применять метод эффективного показателя преломления.

В третьей главе исследуются оптические свойства многомодовых интерференционных делителей и направленных ответвителей, приводятся результаты моделирования распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях. Один из разделов главы посвящен разработке модели многомодового интерференционного делителя на основе метода модового согласования и методики расчета его S-параметров. В тексте данного раздела подробно приведены шаги вывода результирующих уравнений.

В четвертой главе исследуются изогнутые волноводы на основе тонкопленочного ниобата лития с геометрическими параметрами поперечного сечения, полученными ранее и описанными во второй главе. В рамках данной главы представлены результаты по расчету зависимости оптических потерь от радиуса изгиба, по определению вида зависимости коэффициентов связи фундаментальных мод от угла поворота волновода. Приводится описание теории связанных мод и способ ее применения для анализа межмодовой связи в изогнутых волноводах. Также в главе представлены результаты моделирования процесса межмодовой перекачки для фундаментальных мод.

Пятая глава посвящена выводу передаточной функции анизотропного кольцевого резонатора и построению метода расчета его спектра пропускания с учетом влияния анизотропии на процесс распространения излучения. В ходе построения модели делается ряд аппроксимаций, которые, однако, подробно не обосновываются. Приведены результаты валидации разработанной модели

на экспериментальных данных, полученными А. Pan и коллегами из Huazhong University of Science and Technology.

В заключении сформулированы основные выводы, которые логически следуют из анализа представленных в работе результатов.

Стоит отметить, что текст диссертационной работы обладает внутренней связностью, а все выводы и положения выстроены логично и обоснованно. Диссертация написана ясным языком с использованием устоявшейся терминологии. Полученные результаты хорошо апробированы и опубликованы в отечественных и зарубежных журналах.

Замечания по работе

1. В работе делается акцент на высоких требованиях к вычислительным ресурсам трехмерного моделирования и на том, что разработанный метод расчета спектра анизотропного резонатора не требует применения вычислительных кластеров. Однако, в тексте диссертации не приведено сравнения какого-либо трехмерного метода моделирования распространения излучения в резонаторе с разработанным методом расчета спектра.
2. В разделе 3.2 для полноты картины следовало бы привести результаты расчетов распределения интенсивности излучения в топологии направленного ответвителя, а также выполнить анализ зависимости однородности коэффициента связи от радиуса изгиба входных и выходных волноводов.
3. Путаница с обозначениями угла наклона боковой стенки волновода. В части рисунков она обозначается θ , а в других α , при этом в ряде рисунков θ обозначает угол поворота изогнутого волновода.
4. Отсутствует единый стиль обозначения рисунков. Где-то рисунки обозначаются русскими буквами, а где-то английскими.
5. В подразделе 1.2, на стр. 22 говорится: «Эффективный показатель преломления является безразмерной величиной и показывает, как быстро накапливается фаза при распространении моды по волноводу.». Из того, что эффективный показатель преломления является безразмерной величиной следует, что он не может напрямую отображать изменение фазы. Возможно, автор имел в виду постоянную распространения.
6. В тексте работы при описании параметров моделирования неоднократно упоминается, что для задания показателей преломления тонкой плёнки ниобата лития используются дисперсионные уравнения для объемных кристаллов LiNbO_3 . При этом автор отмечает, что показатели преломления тонкоплёночного LiNbO_3 могут отличаться, однако не делает предположений о том, какую величину может иметь это отличие или как это отличие может повлиять на отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных.
7. На странице 40 автор вводит критерий для определения типа поляризации моды (формула 2.9). Критерий определяет, что если доля горизонтальной поляризации составляет от 60 до 100%, то мода является ТЕ-поляризованной, если доля горизонтальной поляризации составляет менее 30%, то мода является ТМ-поляризованной, если доля горизонтальной

поляризации составляет от 30 до 60 %, то моду стоит считать гибридной. Таким образом, ширина диапазона, в котором мода признается ТЕ-поляризованной составляет 40%, а для ТМ и гибридной моды ширина аналогичного диапазона составляет 30%. Из текста работы не ясно, по какому принципу выбирались границы диапазонов и чем обусловлена разница в ширине диапазонов.

8. При описании процесса моделирования ММІ-делителя автор приводит изображения распределения напряженности полей в топологии делителя, полученных с помощью разработанной модели и ВРМ (например, рисунок 32). Автор отмечает: «С помощью разработанной модели были получены аналогичные результаты как в части значений коэффициентов передачи, так и в части распределения излучения внутри топологии многомодовой области.». При этом автор не приводит никаких численных оценок схожести распределения излучения внутри топологии многомодовой области.

Указанные недостатки не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе, выполненной на высоком уровне и представляющей завершённое научное исследование.

Рекомендации по практическому использованию результатов и выводов диссертационного исследования

Результаты диссертационного исследования могут находить применение при разработке устройств фотоники и оптоэлектроники на тонкопленочном ниобате лития для применения в телекоммуникациях, квантовых вычислениях, сенсорике и других областях. Необходимо отметить, что ввиду высокой стоимости подложек тонкопленочного ниобата лития (свыше 500 т.р. за 1 подложку диаметром 4 дюйма) применение методов математического моделирования элементов фотонных интегральных схем для снижения затрат на производстве является критически важным. Таким образом, результаты работы Москалева Д.Н., нацеленные на создание моделей, описывающих оптические характеристики делителей и кольцевых резонаторов, разработку программ для моделирования в фотонике, обладают особенной практической ценностью.

Заключение

Следует сделать вывод, что диссертационная работа Д.Н. Москалева выполнена на высоком научном уровне, содержит новые и практически значимые результаты. Диссертационная работа Москалева Дмитрия Николаевича на тему «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» полностью соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены 24 марта 2025 года на расширенном научно-техническом семинаре кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (протокол № 6 от 24 марта 2025 г.)

Отзыв подготовлен кандидатом технических наук, заведующим лабораторией фотонных интегральных схем, доцентом кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники Периным Антоном Сергеевичем.

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Адрес организации: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Телефон: +7 (3822) 51-05-30

Почта: office@tusur.ru

Официальный сайт в сети Интернет: <https://tusur.ru/ru>

Заведующий лабораторией фотонных интегральных схем, доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, к.т.н. (специальность 01.04.03 – Радиофизика), доцент
Перин Антон Сергеевич

 anton.s.perin@tusur.ru

Перина А.С. удостоверяю:

ДОСТОВЕРЯЮ

секретарь

 - Е.В. Прокопчук

