

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»**

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19
по диссертации Москалева Дмитрия Николаевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите «07» марта 2025 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «06» апреля 2022 г. № 35-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым - четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре Нанотехнологий и микросистемной техники, физического факультета, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Волынцев Анатолий Борисович, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники физико-математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

1. Злоказов Евгений Юрьевич, доктор физико-математических наук (01.04.21 – Лазерная физика), профессор кафедры лазерной физики (№ 37) института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ».

2. Боровкова Ольга Владимировна, 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».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией, соответствием области научных интересов и направлений исследований тематике диссертационной работы, а также наличием публикаций в высокорейтинговых научных изданиях, соответствующих специальности 1.2.2.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск. Отзыв ведущей организации утвержден Рулевым Виктором Михайловичем, доктором технических наук, профессором, ректором, заслушан на расширенном научно-техническом

семинаре кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (протокол № 6 от 24 марта 2025 г.) и подписан Периным Антоном Сергеевичем, кандидатом технических наук, доцентом, доцентом кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, заведующим лабораторией фотонных интегральных схем.

Выбор ведущей организации обосновывается научной деятельностью сотрудников организации, связанной с тематикой диссертации, и уровнем компетенций, позволяющих квалифицированно оценить значимость полученных в рамках диссертационного исследования результатов для развития отрасли физико-математических наук.

По теме диссертации соискателем опубликован 21 научный труд, в том числе 5 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 5 работ – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science Core Collection, Mathematics, Scopus, Springer, MathSciNet и т.д., соискателем получено 9 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Moskaev D., Voblikov E., Kozlov A., Salgaeva U., V Maximenko, Krishtop V. Model of anisotropic ring resonator based on coupled mode theory // Optics Continuum. – 2025. – Т. 4. – №. 2. – С. 210-226. (вклад автора 70%) (WoS, Scopus)

В данной статье Д.Н. Москалевым представлены результаты разработки математической модели процесса распространения излучения в анизотропном кольцевом резонаторе. Особенностью разработанной модели является то, что она учитывает влияние оптической анизотропии на характеристики распространяющегося излучения. Также в данной работе предложен метод расчета спектра анизотропного кольцевого резонатора и выполнена валидация модели на известных экспериментальных данных.

2. Moskaev D., Kozlov A., Salgaeva U., Krishtop V., Perminov A., Venediktov V. A Semi-Analytical Method for the S-Parameter Calculations of an $N \times M$ Multimode Interference Coupler // Photonics. – 2023. – Т. 10. – №. 11. – С. 1260-1275. (WoS, Scopus) (вклад автора 70%)

В указанной работе соискателем представлена математическая модель для описания процесса распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе с произвольным числом входных и выходных волноводов и приведена разработанная методика расчета S-параметров делителя. Кроме того, авторами статьи представлены результаты проверки адекватности разработанной методики и лежащей в ее основе модели.

3. Moskaev D., Kozlov A., Salgaeva U., Krishtop V., Volyntsev A. Applicability of the Effective Index Method for the Simulation of X-Cut LiNbO₃ Waveguides // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 11. – С. 6374-6387. (WoS, Scopus) (вклад автора 50%)

В рамках данной статьи соискателем представлены результаты определения диапазона геометрических параметров поперечного сечения канальных волноводов из тонкопленочного ниобата лития, в пределах которого метод эффективного показателя преломления применим и дает результаты, хорошо согласующиеся с расчетами, выполненными с помощью строгих численных методов моделирования. В дополнение к этому, соискателем совместно с соавторами описан процесс экспериментального определения величины наследуемой шероховатости боковой стенки волновода от металлической маски, а также приведены оценки величины оптических

потерь, вызванных рассеянием излучения в зависимости от величины шероховатости.

4. Kozlov A., Moskalev D., Salgaeva U., Bulatova A., Volyntsev A, Syuy A. Reactive Ion Etching of X-Cut LiNbO₃ in an ICP/TCP System for the Fabrication of an Optical Ridge Waveguide //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 4. – С. 2097-2121. (вклад автора 30%) (WoS, Scopus)

В данной работе основное внимание было направлено на описание разработки технологии реактивного ионного травления ниобата лития для изготовления фотонных интегральных схем из тонкопленочного ниобата лития. Непосредственно соискатель приводит результаты математического моделирования оптических свойств канальных волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития X-среза характеризующие границы геометрических параметров волноводов, в пределах которых наблюдается одномодовое распространение излучения. Полученные экспериментальные и теоретические результаты разясняются соискателем совместно с соавторами.

5. Гилев Д.Г., Журавлёв А.А., Москалев Д.Н., Чувызгалов А.А., Криштоп В.В. Характеристики различных чувствительных элементов миниатюрного резонансного оптического гироскопа // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 59–69. (вклад автора 20%) (WoS, Scopus)

В статье представлены результаты измерения оптических свойств различных типов чувствительных элементовна основе резонаторов, использующихся для определения угловой скорости. В тексте работы описаны преимущества и недостатки, измеренные добротность, ширина резонансных пиков на полувысоте и минимально детектируемая угловая скорость каждого из типов чувствительных элементов. Соискателем совместно с соавторами описываются результаты проведенных исследований резонаторов различных типов.

6. Москалев Д.Н., Вобликов Е.Д., Криштоп В.В., Максименко В.А., Волынцев А.Б. Использование теории связанных мод при моделировании межмодовой связи в изогнутых волноводах на основе тонкопленочного ниобата лития // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67. № 8. С. 697-712. (вклад автора 70 %) (РИНЦ)

В данной работе приводятся результаты расчетов процесса межмодовой связи в изогнутых канальных волноводах из тонкопленочного ниобата лития, выполненных соискателем с помощью численного моделирования. Полученные результаты характеризуют виды зависимостей коэффициентов связи, а также интенсивности ТМ-моды после прохождения кольцевого волновода от параметров его поперечного сечения и от длины волны. В заключении статьи, приводится интерпретация полученных результатов, выполненная соискателем совместно с соавторами.

7. Moskalev D. N., Kozlov A. A. Numerical Study of the Influence of the Microtrenches on Optical Properties of Integrated Optical Waveguides on Lithium Niobate on Insulator //2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2023. – С. 180-184. (вклад автора 70%) (Scopus)

В статье описаны результаты решения соискателем задачи математического моделирования влияние микроканалов травления на оптические свойства прямых и изогнутых волноводов из тонкопленочного ниобата лития X-среза. Приводится интерпретация, полученных результатов, выполненная соискателем совместно с соавтором, которая показывает, что благодаря наличию микроканалов снижается величина оптических потерь на изгибе волновода, что потенциально дает возможность создания волноводов с меньшим радиусом кривизны.

8. Москалев, Д.Н. Моделирование многомодового интерференционного делителя 2×2 / Д.Н. Москалев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 8. – С. 17–28. (вклад автора 100%) (РИНЦ)

В рамках статьи рассматриваются источники ошибок вычисления S-параметров многомодовых интерференционных делителей, рассчитанных с помощью разработанной

соискателем модели для расчета S-параметров делителей; проводится сравнение полученных результатов с данными, определяемыми методом распространяющегося пучка.

9. Салгаева У.О., Москалев Д.Н., Козлов А.А. Гибридное интегрально-оптическое устройство// Патент на изобретение RU 2781367 С1, 11.10.2022. Заявка № 2021138654 от 24.12.2021 (вклад автора 25%) (Патент)

В патенте представлено изобретение для ввода и вывода оптического излучения в высококонтрастные волноводы на ниобате лития (Гибридное интегрально-оптическое устройство). Соискателем была разработана конструкция гибридного интегрально-оптического устройства и проведены оценки его оптических характеристик.

10. Москалев Д.Н. Программное средство для расчета поперечного сечения оптического волновода методом эффективного показателя преломления. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022611359, 24.01.2022. Заявка № 2022610286 от 13.01.2022. (вклад автора 100%)

Программа предназначена для расчета характеристик оптических мод, распространяющихся в канальных оптических волноводах. Программа написана на языке программирования Python и реализует метод эффективного показателя преломления. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

11. Москалев Д.Н., Кондаков А.А. Программное средство для моделирования оптического волновода с переменной шириной. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681247, 10.11.2022. Заявка № 2022681094 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета характеристик оптических мод, распространяющихся в канальных оптических волноводах с переменной шириной. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

12. Москалев Д.Н., Салгаева У.О. Программа для моделирования оптического волновода с переменным показателем преломления. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681248, 10.11.2022. Заявка № 2022681096 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета характеристик оптических мод, распространяющихся в канальных оптических волноводах с переменным показателем преломления материалов. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

13. Москалев Д.Н., Кондаков А.А. Программа для моделирования оптического волновода с переменным углом наклона боковых стенок. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681250, 10.11.2022. Заявка № 2022681098 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета характеристик оптических мод, распространяющихся в канальных оптических волноводах с переменным углом наклона боковых стенок волновода. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

14. Москалев Д.Н., Салгаева У.О. Программа для моделирования оптического волновода при заданном наборе длин волн. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681254, 10.11.2022. Заявка № 2022681104 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета характеристик оптических мод, распространяющихся в канальных оптических волноводах в зависимости от длины волны. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix

Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

15. Москалев Д.Н., Козлов А.А. Программа для определения критического радиуса кривизны при моделировании оптического волновода. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681255, 10.11.2022. Заявка № 2022681105 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета критического радиуса кривизны канального волновода. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

16. Москалев Д.Н., Козлов А.А. Программа для моделирования поперечного сечения многомодового интерференционного делителя. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681256, 10.11.2022. Заявка № 2022681106 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для расчета свойств оптических мод в поперечном сечении многомодовой области многомодового интерференционного делителя. Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

17. Москалев Д.Н., Козлов А.А. Программа для моделирования распространения излучения в топологии многомодового интерференционного делителя 1×2 . Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681257, 10.11.2022. Заявка № 2022681107 от 10.11.2022. (вклад автора 70%)

Программа предназначена для моделирования процесса распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях 1×2 . Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

18. Москалев Д.Н., Козлов А.А. Программа для моделирования распространения излучения в топологии многомодового интерференционного делителя 3×3 . Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681259, 10.11.2022. Заявка № 2022681110 от 10.11.2022.

Программа предназначена для моделирования процесса распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях 3×3 . Программа написана на скриптовом языке программирования в программном продукте Phoenix Optodesigner. Вклад соискателя: написание расчетного скрипта программы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработан** новый метод расчета спектра оптически анизотропного кольцевого резонатора из тонкопленочного ниобата лития, учитывающий влияние оптической анизотропии волноводного материала на процесс распространения излучения в резонаторе; **разработана** методика расчета коэффициентов передачи многомодовых интерференционных делителей с произвольным числом входных и выходных волноводов; **определен** диапазон геометрических параметров поперечного сечения канальных волноводов из тонкопленочного ниобата лития, в пределах которого применим метод эффективного показателя преломления для расчета оптических свойств фундаментальных мод; **определены** зависимости коэффициентов связи между данными модами от длины волны, угла поворота и угла наклона боковой стенки волновода.

Теоретическая значимость исследования обоснована решением задачи разработки нового метода расчета спектра оптически анизотропного кольцевого резонатора, результаты применения которого расширяют понимание процессов

модовой гибридизации, приводящей к взаимному обмену мощностью и изменению состояния поляризации излучения в кольцевом волноводе резонатора, влияющих на характеристики его спектра.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы и подходы математического моделирования, в том числе численные методы, теория оптических волноводов, методы физической оптики и фотоники; **изложены** физические механизмы, объясняющие резкое изменение величины свободного спектрального диапазона резонатора для длин волн из области гибридизации; **изучена** связь данного явления с межмодовой перекачкой мощности в резонаторе; **проведена модернизация** модели распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе, позволяющая аналитически вычислять коэффициенты передачи и распределение электромагнитного поля делителя; **проведена модернизация** матричной модели оптически изотропного кольцевого резонатора обобщающая данную модель на случай оптически анизотропных кольцевых резонаторов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработаны и внедрены** дополнительные программные модули для моделирования распространения излучения в прямых и изогнутых волноводах, оптических делителях и других оптических элементах в российское программное обеспечение Difra; **разработана** конструкция гибридного интегрально-оптического устройства, получен патент на изобретение; **определены** геометрические параметры оптических волноводов и делителей мощности из тонкопленочного ниобата лития с учетом технологических особенностей производства, а также величины оптических потерь, вызванных рассеянием излучения на шероховатостях боковой стенки волновода; **созданы** и зарегистрированы программы для численного моделирования процессов распространения излучения в элементах фотонных интегральных схем в пакете прикладных программ Phoenix Optodesigner.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: **обоснованность** результатов диссертационной работы определяется корректным применением методов математического моделирования в фотонике, апробированных методов вычислительной математики и информационных технологий; **достоверность** подтверждается соответствием результатов полученных в ходе выполнения диссертационной работы данным опубликованным другими авторами; удовлетворительным соответствием результатов исследований предельных случаев для разработанных моделей.

Личный вклад соискателя состоит в: проведении критического анализа литературы, разработке расчетных программ в пакете прикладных программ Phoenix Optodesigner, обоснованном выборе численных методов для решения задач моделирования распространения излучения в элементах фотонных интегральных схем, разработке и внедрении расчетных программных модулей в программное обеспечение Difra, выполнении численного моделирования процессов распространения излучения в оптических волноводах, делителях мощности и в кольцевых резонаторах, тестировании конечно-разностных сеток, разработке математических моделей, интерпретации результатов моделирования и подготовке

основных публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. № 27-О: в ней изложены и научно обоснованы метод расчета спектра оптически анизотропного кольцевого резонатора, методика расчета коэффициентов передачи многомодовых интерференционных делителей, найдены геометрические параметры волноводов и делителей мощности из тонкопленочного ниобата лития, обеспечивающие требуемую функциональность, получены зависимости коэффициентов перекачки мощности между фундаментальными модами в изогнутых волноводах. Все это имеет важное значение для математического моделирования и проектирования новых устройств фотоники для нелинейных, квантовых и высокочастотных применений.

На заседании «20» мая 2025 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Москалеву Дмитрию Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук (Протокол заседания №6)

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 13 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 13, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

д-р физ.-мат. наук, профессор

(подпись)

_____/ Трусов Петр Валентинович

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

канд. физ.-мат. наук, доцент

(подпись)

_____/ Кротова Елена Львовна

«20» мая 2025 г.

