

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО «Пермский
государственный национальный
исследовательский университет»
кандидат физико-математических наук
Владимир Александрович Ирха



 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертационная работа Москалева Дмитрия Николаевича «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» выполнена на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

В период подготовки диссертации Москалев Дмитрий Николаевич с 2019 г. по 2023 г. обучался в аспирантуре ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники по направлению подготовки 03.06.01 – «Физика и астрономия», выдан диплом об окончании аспирантуры № 105931 серия 0463180, регистрационный номер 1301 от 17 июля 2023 г., с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». С 2017 г. по 2025 г. работал в ПАО «Пермская научно-производственная

приборостроительная компания» в должностях инженера-исследователя, ведущего инженера исследователя, с 2019 г. по 2025 г. в ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» в должности ассистента на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники.

В 2019 году Д.Н. Москалев окончил магистратуру ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по направлению подготовки 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» с присвоением квалификации «магистр».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Волынцев Анатолий Борисович, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники Пермского государственного национального исследовательского университета.

По итогам обсуждения на расширенном заседании кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Физико-математического института принято следующее заключение:

1. Личное участие в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в следующем:

Все результаты, защищаемые в диссертационной работе, получены Д.Н. Москалевым лично или при его непосредственном участии: аналитический обзор, постановка цели работы, выполнение численного исследования оптических свойств прямых и изогнутых волноводов, делителей мощности на основе тонкопленочного ниобата лития, построение математической модели многомодового интерференционного делителя и разработка методики расчета S-параметров многомодовых интерференционных делителей, разработка математической модели для описания спектральной характеристики анизотропного кольцевого резонатора, а также методики ее расчета, валидация предложенной математической модели.

2. Научная новизна диссертационного исследования определяется следующими положениями:

- впервые определен диапазон параметров поперечного сечения канальных волноводов на основе Х-среза ТНЛ, в пределах которого применим метод эффективного показателя преломления применен для моделирования;
- впервые предложена математическая модель, позволяющая моделировать многомодовый интерференционный делитель с произвольным числом входных и выходных волноводов без ограничения на количество распространяющихся мод;
- впервые 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;
- впервые разработана математическая модель для расчета оптического спектра пропускания анизотропного кольцевого резонатора.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Результаты численного исследования оптических свойств волноводов и оптических делителей на основе тонкопленочного ниобата лития в предельных случаях согласуются с данными, опубликованными другими авторами. Достоверность результатов, полученных с помощью разработанных моделей распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе и расчета спектра оптически анизотропного кольцевого резонатора, подтверждается проверкой другими численными методами, а также согласием с известными экспериментальными данными.

4. Практическая и теоретическая значимость работы.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной модели распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе для исследования различных топологий делителя с произвольным числом входных и выходных волноводов и распространяющихся мод. Также данная модель и соответствующая методика могут применяться для расчета S-параметров многомодовых интерференционных делителей для последующего использования в схемотехническом моделировании. Разработанная модель и методика расчета спектра анизотропного кольцевого резонатора может быть использована при проектировании устройств на основе фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития, содержащих кольцевые резонаторы.

Результаты численного моделирования оптических волноводов и делителей могут быть использованы при изготовлении фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития. Помимо перечисленных результатов, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования, соискателем были использованы при разработке программных модулей для программного продукта Difra, предназначенного для комплексного моделирования и проектирования фотонных интегральных схем

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых математических моделей распространения излучения в многомодовых интерференционных делителях, расчете спектра оптически анизотропного кольцевого резонатора и создании соответствующих методик применения данных моделей.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По материалам диссертационного исследования опубликовано 21 научная 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.

Основные печатные работы по теме диссертации

1. **Moskalev 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 12/17 с) (**WoS, Scopus**)

В работе соискателем представлена математическая модель процесса распространения излучения в анизотропном кольцевом резонаторе, учитывающая влияние оптической анизотропии на характеристики проходящего излучения, разработан метод расчета спектра анизотропного кольцевого резонатора. Соискателем выполнено математическое моделирование (с использованием разработанных программных модулей, которые были внедрены в программный продукт Difra) кольцевого резонатора. Совместно с соавторами была проведена валидация разработанных модели и методики, исследованы поляризационно-оптические свойства излучения в резонаторе, дана интерпретация полученных результатов.

2. **Moskalev 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. (WoS, Scopus) (вклад автора 10/15 с)

В работе соискателем представлена математическая модель процесса распространения излучения в многомодовом интерференционном делителе с произвольным числом входных и выходных волноводов, разработана методика расчета S-параметров делителя. Совместно с соавторами выполнено математическое моделирование (с использованием разработанных соискателем модулей, которые были внедрены в программный продукт Difra) многомодового интерференционного делителя 1×2 , проведено

сравнение результатов полученных, с помощью разработанной модели и методом распространяющегося пучка, дана интерпретация полученных результатов.

3. **Moskalev 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. (вклад автора 7/13 с) (**WoS, Scopus**)

В статье представлены результаты исследования применимости метода эффективного показателя преломления к задаче расчета характеристик оптических мод канальных волноводов, направленных вдоль Y-кристаллофизической оси, из тонкопленочного ниобата лития X-среза. С помощью разработанных соискателем программы, реализующей метод эффективного показателя преломления, и программных модулей, внедренных в ПО Difra, был определен диапазон геометрических параметров поперечного сечения канальных волноводов, в пределах которого справедлив метод эффективного показателя преломления. Совместно с соавторами проведено экспериментальное определение величины наследуемой шероховатости боковой стенки волновода от металлической маски, а также оценены 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. (вклад автора 3/14 с) (**WoS, Scopus**)

В статье представлены результаты разработки технологии реактивного ионного травления ниобата лития. В рамках данной статьи соискателем выполнено математическое моделирование оптических свойств канальных волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития X-среза с целью определения границ одномодового распространения излучения. Совместно с соавторами выполнена интерпретация полученных экспериментальных результатов и результатов математического моделирования.

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 1/11 с) (**WoS, Scopus**)

В статье представлены результаты исследования различных типов оптических чувствительных элементов на основе оптических резонаторов. Совместно с соавторами соискателем проведены исследования различных типов резонаторов, проведена интерпретация результатов.

6. **Москалев Д.Н.**, Вобликов Е.Д., Криштоп В.В., Максименко В.А., Волинцев 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 11/16 с) (**РИНЦ**)

В данной работе рассматривается задача расчета оптической межмодовой связи в изогнутых канальных волноводах на основе тонкопленочного ниобата лития. Соискателем выполнена математическая постановка задачи расчета коэффициентов связи на основе теории связанных мод для анизотропных волноводов для случаев сильного и слабого возмущения тензора диэлектрической проницаемости. С помощью численного моделирования определен вид зависимостей коэффициентов связи от параметров поперечного сечения канальных волноводов и от длины волны. На основе полученных данных проведено математическое моделирование процесса межмодовой связи в изогнутых канальных волноводах. Совместно с соавторами выполнена интерпретация результатов.

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 3/5 с) (**Scopus**)

В статье представлено исследование соискателем с помощью математического моделирования влияния микроканалов травления на оптические свойства прямых и изогнутых волноводов из тонкопленочного ниобата лития Х-среза. Построены зависимости эффективных показателей преломления от длины волны, получены численные оценки оптических потерь на изгибе для волноводов с микроканавками и без микроканалов. Совместно с соавтором выполнена интерпретация полученных результатов.

8. **Москалев, Д.Н.** Моделирование многомодового интерференционного делителя 2×2 / Д.Н. Москалев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 8. – С. 17–28. (вклад автора 12/12 с) (**РИНЦ**)

В данной статье соискателем представлено исследование разработанной математической модели многомодового интерференционного делителя (представленной в статье «A Semi-Analytical Method for the S-Parameter Calculations of an $N \times M$ Multimode Interference Coupler»). В рамках статьи рассматриваются источники ошибок вычисления S-параметров многомодовых интерференционных делителей, проводится сравнение полученных результатов с методом распространяющегося пучка.

9. **Салгаева У.О., Москалев Д.Н., Козлов А.А.** Гибридное интегрально-оптическое устройство// Патент на изобретение RU 2781367 C1, 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 параметров.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертация «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» Москалева Дмитрия Николаевича соответствует паспорту специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертация Москалева Дмитрия Николаевича отвечает требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Представленная Москалевым Дмитрием Николаевичем диссертация на тему «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития», выполненная на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники, является законченной научно-квалификационной работой. Работа выполнена на актуальную тему и содержит решение важных научно-технических задач.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Москалев Дмитрий Николаевич проявил себя как квалифицированный научный работник, способный ставить и решать теоретические и практические задачи.

Диссертация Москалева Дмитрия Николаевича «Математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе тонкопленочного ниобата лития» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Физико-математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

В голосовании приняли участие 20 человек. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 5 от «20» февраля 2025 г.

_____ Барулина Марина Александровна,
д.ф.-м.н, директор Физико-математического
института, председатель заседания кафедры
нанотехнологий и микросистемной техники

_____ Скачкова Елена Александровна,
начальник отдела сопровождения учебного
процесса Физико-математического
института, секретарь заседания кафедры
нанотехнологий и микросистемной техники

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, тел. 8 (342) 2396227, факс (342) 2371611 e-mail: info@psu.ru

И.Т. Барулиной
И.Т. Барулиной
И.Т. Скачкова заверяю
И.Т. Скачкова
И.Т. Антимонова
И.Т. Антимонова