На правах рукописи

МОСКАЛЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО НИОБАТА ЛИТИЯ

1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

ПЕРМЬ – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ), кафедра нанотехнологий и микросистемной техники

Научный	Волынцев Анатолий Борисович,
руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий и микросистемной техники физико-математического института ФГАОУ ВО ПГНИУ
Официальные	Злоказов Евгений Юрьевич
оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики (№37) института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ
	Боровкова Ольга Владимировна
	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник группы Квантовой оптики, ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».
)	20 2025 16.00

Защита состоится «20» мая 2025 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ .01.19 по адресу: 614990, г.Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (http://www.pstu.ru).

Автореферат разослан « » апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного

совета Д ПНИПУ .01.19,

кандидат физико-математических наук,

доцент

Е.Л. Кротова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Фотонные интегральные схемы (ФИС) находят применения в самых разных областях науки и технологии, благодаря тому, что, конструируя ФИС из отдельных базовых элементов с заданными характеристиками, возможно получить различный функционал.

Существует большое число базовых элементов ФИС. Одним из ключевых является кольцевой резонатор, важнейшей характеристикой которого является его спектр пропускания. Определение требуемых характеристик кольцевого резонатора только с помощью эксперимента потребовало бы больших затрат временных и поэтому фотонике широко денежных ресурсов, В применяются методы математического моделирования. Задача расчета спектра пропускания кольцевого резонатора может решаться методами прямого моделирования, когда моделируется распространение излучения в резонаторе целиком, а также схемотехническими методами, позволяющими рассчитывать спектр резонатора, поэтапно вычисляя оптические характеристики входящих в него элементы.

Одним из материалов, на основе которого изготавливают кольцевые резонаторы, является тонкопленочный ниобат лития (ТНЛ), ставший за последнее время одним из ключевых материалов в фотонике. Прогнозирование оптических характеристик кольцевого резонатора на этом материале затруднено вследствие влияния оптической анизотропии на процесс распространения излучения в нем. Объемное исследование оптических свойств кольцевых резонаторов на основе ТНЛ с применением трехмерного моделирования, изготовления и эксперимента было выполнено А. Паном и коллегами в Хуачжунском университете науки и технологии. Одной из задач, которые решались в этом исследовании было показать, как влияет оптическая анизотропия на спектр резонатора.

При проектировании устройств на основе ФИС, требуется проведение десятков итераций расчетов, поэтому трехмерное моделирование, ввиду его высоких требований к вычислительным ресурсам, подходит плохо. Существующие эффективные схемотехнические методы расчета спектра пропускания на основе теории матриц передачи работают только для кольцевых резонаторов на основе изотропных материалов. В литературе опубликованы результаты исследований, посвященные анализу межмодовой связи, вызванной влиянием оптической анизотропии на процесс распространения излучения, в резонаторах на основе Х-среза ТНЛ (Кортес-Херрера и Агравал, университет Рочестера). Однако моделей и методов наподобие тех, что были разработаны для изотропных резонаторов на данный момент представлено не было.

Таким образом, объектом исследования диссертационной работы является процесс распространения излучения в оптически анизотропном кольцевом резонаторе; предметом исследования является влияние оптической анизотропии Х-

среза ТНЛ на характеристики излучения, распространяющегося в кольцевом резонаторе.

Целью диссертационной работы является разработка математической модели процесса распространения излучения в оптически анизотропном кольцевом резонаторе.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) разработка программных модулей для расчета оптических свойств волноводов и делителей мощности методом конечных разностей в частотной области и методом эффективного показателя преломления (ЭПП);

2) численное исследование оптических свойств и поиск допустимых геометрических параметров волноводов и делителей мощности, изготовленных на основе Х-среза ТНЛ с учетом технологических ограничений;

3) вывод уравнений передаточной функции кольцевого резонатора;

4) разработка программного модуля для исследования оптических свойств анизотропного кольцевого резонатора.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1) впервые применен метод эффективного показателя преломления для моделирования канальных волноводов на основе Х-среза ТНЛ;

2) впервые предложена математическая модель, позволяющая моделировать многомодовый интерференционный делитель с произвольным числом входных и выходных волноводов без ограничения на количество распространяющихся мод;

3) 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;

4) впервые разработана математическая модель для расчета оптического спектра пропускания анизотропного кольцевого резонатора.

Практическая значимость работы:

1) применение метода эффективного показателя преломления позволяет ускорить оценку параметров оптических мод волноводов из ТНЛ;

2) с помощью разработанной математической модели многомодового интерференционного делителя были получены матрицы S-параметров для делителей 1×2 и 2×2 на основе ТНЛ; данные матрицы в дальнейшем будут применяться в схемном моделировании комплексных ФИС;

3) результаты выполненного моделирования перекачки мощности между фундаментальными модами в изогнутых волноводах могут быть использованы для определения параметров поперечного сечения и длин волн, соответствующих минимальной перекачке;

4) разработанная модель позволяет рассчитывать спектр пропускания анизотропного кольцевого резонатора большого радиуса на персональном компьютере без необходимости использования вычислительных кластеров;

5) разработанные программные модули для моделирования распространения излучения в прямых и изогнутых волноводах, оптических делителях и других оптических элементах внедрены в виде комплекса программ в российское программное обеспечение для моделирования и проектирования фотонных интегральных схем Difra.

Методология и методы исследования. При выполнении поставленных задач использовались хорошо апробированные теоретические методы и подходы, а именно, теория связанных мод, метод модового согласования, метод распространяющегося пучка, метод эффективного показателя преломления. В ходе численного решения краевых задач и задачи Коши использовались стандартные численные методы, в частности, метод конечных разностей, метод Рунге-Кутты, итерация Арнольди. Численная реализация комплексов программ и обработка полученных результатов были выполнены на языке программирования Python. Также ряд программ были реализованы в программном обеспечении Phoenix Optodesigner.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) диапазон геометрических параметров поперечного сечения канальных волноводов из тонкопленочного ниобата лития Х-среза, в пределах которого применим метод эффективного показателя преломления для расчета оптических свойств фундаментальных мод;

2) методика расчета S-параметров многомодовых интерференционных делителей с произвольным числом входных и выходных волноводов, позволяющая аналитически вычислять коэффициенты разложения в методе модового согласования;

3) вид зависимостей коэффициентов связи фундаментальных мод, учитывающих длину волны, оптическую анизотропию и геометрические параметры поперечного сечения канального волновода из тонкопленочного ниобата лития X - среза;

4) метод расчета спектра кольцевого резонатора на основе матричной математической модели процесса распространения излучения, учитывающей оптическую анизотропию материала резонатора.

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. Также достоверность разработанной модели для расчета оптического спектра анизотропного кольцевого резонатора подтверждается совпадением с моделью для расчета оптического спектра изотропного кольцевого резонатора в предельном случае отсутствия связи между модами.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на различных научных конференциях: на Международной научно-практической конференции «Optical reflectometry, metrology and sensing» (г.Пермь, 2018); на Семинаре по теоретической физике (рук., д.ф.-м.н. В.А. Демин, г. Пермь, 2021); на Всероссийской научной конференции с международным участием Невская фотоника (г. Санкт-Петербург, 2023); на международной конференции IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (Эрлагол, 2023 г.); на Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике ВКВО-2023 (г. Пермь, 2023); на 26-й Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2023); на 21-ой международной конференции по лазерной оптике ICLO-2024 (г. Санкт-Петербург, 2024); на XXI Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (г. Казань, 2024 г.); на XIII, XIV Международной конференции по фотонике и информационной оптике (г. Москва, 2024, 2025 гг.).

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.

Личный вклад автора. Численное моделирование прямых и изогнутых волноводов, оптических делителей, оптической связи в изогнутых волноводах, кольцевых резонаторов, тестирование конечно-разностных сеток для задач моделирования прямых и изогнутых волноводов. Разработка программ для моделирования прямых и изогнутых волноводов, оптических делителей на основе метода конечных разностей, разработка математических моделей, их реализация в программном коде, обработка результатов моделирования проведены автором лично. Постановка задач и интерпретация результатов проводилась с участием соавторов и руководителя.

Структура и объем 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность темы исследования и дана общая характеристика работы.

В первой главе приводится описание технологий интегральной фотоники и решаемых с их помощью задач, а также используемых для изготовления фотонных интегральных схем материалов. Дается описание ниобата лития, как одного из ключевых элементов фотоники, его преимуществ и недостатков. Рассматривается тонкопленочных ниобат лития для изготовления комплексных фотонных интегральных схем в состав которых входят кольцевые резонаторы. Приводится обзор методов прямого и схемотехнического моделирования анизотропных кольцевых резонаторов и других элементов ФИС.

Вторая глава посвящена задаче расчета оптических характеристик волноводов на основе ТНЛ с целью определения оптимальных геометрических параметров поперечного сечения. Моделирование прямых волноводов проводилось методом конечных разностей в частотной области (КРЧО) и методом эффективного показателя



Рисунок 1 – Схематическое изображение поперечного сечения исследуемого

преломления (метод ЭПП). Моделирование выполнялось для волноводов, ориентированных вдоль кристаллофизических осей Y и Z, для различных углов наклона боковой стенки θ , глубины травления H_e и ширины волновода W_t (Рисунок 1). Толщина волноводной пленки H_f равнялась 600 нм и не менялась в процессе моделирования, так как в будущем изготовление ФИС планируется делать с использованием пластин указанной толщины.

Одним из критериев, определяющих справедливость применения метода ЭПП, является гибридность мод. В общем случае оптические моды в канальных волноводах являются гибридными, то есть все компоненты электромагнитного поля являются ненулевыми. Однако при определенных условиях существующие моды могут быть поляризованы преимущественно вдоль поперечных осей. Такие моды можно рассматривать как ТЕ- и ТМ-моды. Критерий, определяющий тип моды задается уравнением:

$$\gamma_{TE} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |E_x|^2 dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} \left(|E_x|^2 + |E_y|^2\right) dx dy},\tag{1}$$

где *Ex* и *E*_y— горизонтальная и вертикальные компоненты вектора напряженности электрического поля. Когда $\gamma_{\text{TE}} > 0,6$, то мода является TE-модой, $\gamma_{\text{TE}} < 0,3$ соответствует TM-моде, а $0,3 \le \gamma_{\text{TE}} \le 0,6$ характеризует гибридную моду в том смысле, что ее нельзя отнести ни к TE-моде, ни к TM-моде.

Впервые показано, что метод ЭПП дает сопоставимый по точности с методом КРЧО результат вычисления ЭПП фундаментальных мод. При этом чем выше степень поляризации γ распространяющихся мод ($\gamma_{TE} \approx 1$ для TE-моды, $\gamma_{TE} \approx 0$ для TM-моды), тем более точный результат достигается. В результате было показано, что относительная ошибка вычисления величины ЭПП фундаментальных TE- и TM-мод

не превышает 3 % для волноводов толщиной 600 нм с углами наклона боковых стенок от 70° до 90° и глубиной травления до 300 нм. Также была выполнена оценка оптических потерь при распространении излучения по волноводу.

В третьей главе рассматривается задача моделирования направленных ответвителей и многомодовых интерференционных делителей (Multimode interference coupler, MMI-делитель), как элементов ввода излучения в кольцевой резонатор; дается описание основных характеристик этих элементов и способов их моделирования.

Далее приводятся результаты расчетов оптических делителей разработанных на основе волноводов с геометрическими параметрами, полученными во второй главе. В качестве метода моделирования применялся двумерный метод распространяющегося пучка в совокупности с методом ЭПП. В данном случае метод ЭПП использовался с целью аппроксимации трехмерной волноводной структуры двумерной, характеризующейся эффективными параметрами подложки и волновода n_{effBG} и n_{effWG} (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема упрощения 3D расчета с помощью метода ЭПП

Также в третьей главе приводится описание разработанной полуаналитической модели многомодового интерференционного делителя на основе метода модового согласование и соответствующей методики моделирования. Ключевым теоретическим положением метода модового согласования является разложение в произвольном поперечном сечении волноводного элемента электромагнитного поля в конечную сумму волноводных вперед- и назад-распространяющихся мод и бесконечный спектр радиационных мод:

$$E(x, y) = \sum_{i} a_{i} E_{i} + \int_{0}^{\infty} a(k_{0}) E(k_{0}) dk_{0}, \qquad (2)$$

где i – номер волноводной моды, k_0 – волновое число, a – амплитуда моды. Если предположить, что в волноводном элементе рассеяние оптического излучения пренебрежимо мало и нет обратных отражений, то в уравнении (2) можно оставить только вперед-распространяющиеся моды.

Ha данных положениях основана разработанная модель. Ее идея заключается в следующем: с помощью метода ЭПП трехмерный интерференционный многомодовый делитель аппроксимируется эквивалентным двумерным делителем; затем двумерный MMI-делитель (например, делителя 2×2 рисунок 3.а) разбивается на однородные участки постоянной ширины (области I, II, III на рисунок 3.б); далее в участках выполняется однородных расчет оптических мод; после этого найденные моды сшиваются на границах однородных областей (сечения AB, CF на рисунке 3) по условию равенства касательных компонент электромагнитного поля. Сшивка полей требует



Рисунок 3 – Схема метода модового согласования

расчета интегралов перекрытия между модами двух однородных областей:

$$a_{jk} = \int_{-\infty}^{\infty} U_k(x) U_j(x) dx, \qquad (3)$$

где U_k и U_j – распределение полей мод в двух однородных областях (например, между модами в области I и модами в области II рисунок 3.б). Интеграл перекрытия может быть вычислен аналитически, ввиду того, что поля мод U_k и U_j задаются аналитическими функциями.

Необходимо отметить, что в разработанной модели не учитывается геометрия входных и выходных тейперов (волноводов с переменной шириной) ММІ-делителя, предполагается что они адиабатические, в них не происходит генерации мод высших порядков и нет потерь излучения. Поэтому моды волновода ищутся в многомодовой области и в сечении волноводов с шириной d (Рисунок 3).

С целью проверки модели было проведено моделирования многомодового интерференционного делителя 1×2 на ТНЛ методом распространяющегося пучка (Beam propagation method, BPM). Было выполнено качественное сравнение распределения интенсивности в многодовой области делителя, полученной в модели и в BPM (Рисунок 4). Количественно сравнивалась величина S-параметров, рассчитанная с помощью BPM и разработанной модели, для фундаментальной моды в зависимости от длины волны излучения (Рисунок 4.в). Результаты, полученные с помощью модели, показали высокую степень согласования с результатами BPM.



Рисунок 4 – Результаты моделирования ММІ-делителя 1×2

В четвертой главе приведены результаты исследования оптических потерь, а также оптической связи между фундаментальными TE- и TM-модами в кольцевых волноводах на основе X-среза THЛ. Данный материал характеризуется тем, что оптические характеристики излучения в плоскости пластины зависят от направления распространения относительно кристаллофизических осей. Другими словами, материальная анизотропия обуславливает зависимость значений элементов тензора диэлектрической проницаемости от направления распространения излучения приводит к тому, что в изогнутых волноводах может меняться состояние поляризации излучения (СПИ) вследствие возникновения межмодовой связи. Чувствительность СПИ к изменению значений элементов тензора диэлектрической проницаемости определяется геометрическими параметрами волновода и оптическими параметрами распространяющихся мод.

Межмодовая оптическая связь в кольцевых волноводах исследовалась с помощью теории связанных мод для анизотропных волноводов. Уравнения связанных мод представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно амплитуд мод:

$$\frac{da_{\mu}}{dz} = -i\beta_{\mu}a_{\mu} + \sum_{\nu} K_{\mu\nu}a_{\nu}, \qquad (4)$$

где a_{μ}, a_{ν} – комплексные амплитуды μ -ой и ν -ой моды соответственно, β_{μ} – постоянная распространения μ -ой моды, $K_{\mu\nu}$ – коэффициент связи между μ -ой и ν -ой модами.

В выполненных расчетах применялась модель нулевого изгиба (Кортес-Херрера и Агравал). Основная идея модели нулевого изгиба заключается в том, что при выборе достаточно большого радиуса кривизны изогнутого волновода его поле моды можно аппроксимировать полем моды прямого волновода. В таком случае, это позволяет пренебречь оптическими потерями на изгибе, изменением распределения полей мод и величин ЭПП в волноводе. Тогда достаточно учитывать влияние анизотропии на процесс распространения излучения в волноводе, рассматривая тензор диэлектрической проницаемости, зависящий от угла поворота волновода θ:

$$\varepsilon(\theta) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{zz} \sin^2 \theta & 0 & \varepsilon_{zz} \cos \theta \sin \theta - \varepsilon_{xx} \cos \theta \sin \theta \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ \varepsilon_{zz} \cos \theta \sin \theta - \varepsilon_{xx} \cos \theta \sin \theta & 0 & \varepsilon_{xx} \sin^2 \theta + \varepsilon_{zz} \cos^2 \theta \end{bmatrix},$$
(5)

В таком случае коэффициент связи определяется следующим уравнением:

$$K_{\mu\nu}(\theta) = \frac{i\omega}{4P} \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\varepsilon_{xz}^2}{\varepsilon_{zz}} - \Delta \varepsilon_{xx} \right) E_{\nu x} E_{\mu x}^* - \frac{\varepsilon_{zz}'}{\varepsilon_{zz}} \varepsilon_{xz} E_{\nu z} E_{\mu x}^* + \varepsilon_{zz}' E_{\mu z}^* \left[\left(\frac{\varepsilon_{zz}'}{\varepsilon_{zz}} - 1 \right) E_{\nu z} - \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} E_{\nu x} \right] \right\} dx dy,$$
(6)

где элементы тензора с апострофом соответствуют прямому волноводу, а без апострофа – изогнутому волноводу.

В выполненном моделировании параметры поперечного сечения кольцевых волноводов были взяты из Главы 2, а радиус изгиба был выбран равным 50 мкм. С помощью векторного модового решателя были найдены ЭПП и распределения полей фундаментальных мод рассматриваемых волноводов в диапазоне длин волн от 1,5 до 1,6 мкм. Далее были вычислены коэффициенты связи (6), после чего методом Рунге-Кутты четвертого порядка решалась система уравнений связанных мод (4). В качестве начальных условий была задана единичная амплитуда ТЕ-моды с нулевой фазой. В результате решения системы были получены зависимости амплитуд и фаз фундаментальных мод в каждой точке кольцевого волновода.

Было установлено, что в кольцевом волноводе наблюдается циклическая взаимная перекачка мощности из ТЕ-моды в ТМ-моду. При этом интенсивность ТМмоды после полного прохождения кольца зависит от длины волны излучения, угла наклона боковых стенок и материала покровного слоя. Полученные результаты



показали, что длины волн, на наблюдается которых наибольшая интенсивность ТМмоды после прохождения кольца, смещаются в длинноволновую область при увеличении угла наклона боковых стенок. Так для волновода с покровным слоем из SiO₂ смещение происходит примерно на 35 нм от длины волны1,545 мкм 1,58 мкм ДО (рисунок 5.а). В случае волновода с воздушным покровным слоем смещение

происходит примерно на 20 нм от 1,52 мкм до 1,54 мкм (рисунок 5.b).

Пятая глава посвящена разработке модели анизотропного кольцевого резонатора и метода расчета его спектра пропускания. На основе теории связанных мод для анизотропных волноводов и метода матрицы передачи была разработана модель кольцевого резонатора и метод, позволяющий получать спектр резонатора с учетом влияния анизотропии на процесс распространения излучения. При



Рисунок 6 – Схема кольцевого резонатора

построении модели рассматривалась конфигурация кольцевого резонатора с одним нагружающим волноводом (Рисунок 6), где E_{i1} – амплитуда входной моды, t – амплитудный коэффициент прохождения, k – амплитудный коэффициент связи, E_{t1} ____ амплитуды излучения, E_{t2} – прошедшего амплитуда излучения, которое входит в кольцо, E_{i2} – амплитуда излучения, прошедшего кольцо. С помощью данных параметров можно охарактеризовать моду с любой поляризацией.

При условии, что в кольцевом резонаторе могут распространяться только фундаментальные моды можно записать матричные уравнения передачи делителя в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} E_{t1}^{TE} \\ E_{t2}^{TE} \\ E_{t1}^{TM} \\ E_{t2}^{TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{TE} & k_{TE} & 0 & 0 \\ -k_{TE}^{*} & k_{TE}^{*} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{TE} & k_{TE} \\ 0 & 0 & -k_{TE}^{*} & -k_{TE}^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}^{TE} \\ E_{i2}^{TE} \\ E_{i1}^{TM} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix}.$$
(7)

Матрица передачи кольца, описывающая процессы распространения излучения по кольцу и перекачки мощности из одной моды в другую, будет определяться матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} E_{i2}^{TE} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2}^{TE} \\ E_{t2}^{TM} \end{bmatrix},$$
(8)

где T₁₁ и T₂₂ – коэффициенты прямой передачи TE- и TM-моды соответственно, а T₁₂ и T₂₁ – коэффициенты перекрестной передачи из TE- в TM-моду и из TM- в TE-моду.

Объединяя системы уравнений (7) и (8) были получены уравнения, описывающие излучение, прошедшее кольцевой резонатор:

$$E_{t1}^{TE} = t_{TE} E_{i1}^{TE} +$$

$$\frac{-|k_{TE}|^2 E_{i1}^{TE} [(1 - t_{TM}^* T_{22}) T_{11} + t_{TM}^* T_{21} T_{12}] - k_{TE} k_{TM}^* E_{i1}^{TM} [(1 - t_{TE}^* T_{11}) T_{12} + t_{TE}^* T_{11} T_{12}]}{(1 - t_{TE}^* T_{11}) (1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}},$$
(9)

$$E_{t1}^{TM} = t_{TM} E_{i1}^{TM} +$$

$$\frac{-k_{TM}k_{TE}^{*}E_{i1}^{TE}[(1-t_{TM}^{*}T_{22})T_{21}+t_{TM}^{*}T_{21}T_{22}] - |k_{TM}|^{2}E_{i1}^{TM}[(1-t_{TE}^{*}T_{11})T_{22}+t_{TE}^{*}T_{12}T_{21}]}{(1-t_{TE}^{*}T_{11})(1-t_{TM}^{*}T_{22}) - t_{TE}^{*}T_{12}t_{TM}^{*}T_{21}}.$$

$$(10)$$

Уравнения (9) и (10) упрощаются до уравнений, описывающих передаточную характеристику изотропного кольцевого резонатора, когда отсутствует межмодовая связь (T_{12} и T_{21} равны нулю) и постоянная распространения не зависит от направления распространения моды.

Коэффициенты передачи кольца T₁₁, T₁₂, T₂₂ и T₂₁ могут быть рассчитаны с помощью решения системы уравнений теории связанных мод для анизотропных волноводов на примере того, как это было сделано в Главе 4.

С целью проверки разработанной модели был получен спектр кольцевого резонатора, экспериментально исследованного в статье А. Пана и коллег. Данный кольцевой резонатор на основе волноводов неглубокого травления из ТНЛ был изготовлен группой А. Пана и имел следующие геометрическими параметрами: ширина верхнего основания $W_t = 1,4$ мкм; высота волноводной пленки $H_f = 0,7$ мкм; глубина травления $H_e = 0,4$ мкм, угол наклона боковой стенки $\theta = 72^\circ$.

Оптические моды и их эффективные показатели преломления в волноводе были найдены с помощью метода КРЧО для длин волн 1,545 – 1,572 мкм. В результате были получены зависимости ЭПП от длины волны для двух фундаментальных мод, а также собственные и перекрестные коэффициенты связи данных мод.

Результаты показали, что область гибридизации, где фундаментальные TE- и TM-моды становятся гибридными приходится на длины волн от 1,534 до 1,544 мкм. Длина волны гибридизации, на которой фазовые скорости фундаментальных мод становятся равными, составляет 1,5388 мкм. Полученное значение длины волны гибридизации хорошо сходится с экспериментально полученным значением в работе А. Пана и коллег.

С целью получения передаточной характеристики кольца для двух фундаментальных мод решалась система уравнений связанных мод в выбранном диапазоне длин волн. На рисунке 7.а показана интенсивность ТЕ-моды, распространяющейся по кольцевому волноводу, в зависимости от длины волны и угла поворота волновода. Результаты показывают, что при распространении излучения на длинах волн, соответствующих области гибридизации, проявляется сильная перекачка мощности в ТМ-моду. На рисунке 7.b показана интенсивность ТМ-моды, видно, что в области гибридизации ее максимальное значение близко к единице (то есть происходит полный обмен мощностью между двумя, взаимодействующими, модами).



Рисунок 7 – Результаты моделирования распространения излучения в кольцевом волноводе

Далее с целью наглядной визуализации СПИ в кольцевом резонаторе на сфере Пуанкаре отображались значения параметров Стокса. Ввиду того, что в настоящей работе интерес представляло только СПИ, то параметры Стокса нормировались на интенсивность. На рисунке 8.с изображены СПИ для набора длин волн, соответствующих области гибридизации (1,5372 мкм, 1,5379 мкм, 1,5384 мкм), длине волны гибридизации (1,5388 мкм) и длине волны вне области гибридизации (1,525 мкм).

Как видно из рисунка, СПИ внутри кольца меняется циклично, образуя замкнутые окружности на сфере Пуанкаре, для всех длин волн кроме длины волны гибридизации (Рисунок 7.с). Состояние поляризации на длине волны гибридизации не меняется при распространении излучения по кольцу и представляет собой линейную поляризацию под углом 45°. В некотором смысле это означает, что на длине волны гибридизации кольцевой волновод становится изотропным (не происходит возникновения обыкновенного и необыкновенного луча так как их фазовые скорости равны). Тем не менее фазовая скорость обеих мод продолжает зависеть от направления распространения относительно кристаллофизических осей. Найденные коэффициенты передачи кольцевого волновода использовались для расчета спектральной характеристики кольцевого резонатора. Чтобы оценить справедливость разработанной модели сравнивался рассчитанный свободный спектральный диапазон (Free spectral range, FSR) с полученным экспериментально (А. Пан и др.) (Рисунок 8).

Для длин волн вне области гибридизации экспериментальный FSR и рассчитанный показали хорошую согласованность (максимальная относительная ошибка составила 6%). Согласно описанию экспериментальных данных,



представленных в исследовании А. Пана, в области гибридизации ожидается что FSR TE- и TM-мод должны быть равны. Однако модель показывает, что в области гибридизации FSR значительно меняется.

Полученные результаты вероятно объяснены могут быть следующим образом. Известно, что циклическое изменение состояния поляризации приводит к появлению так называемой геометрической фазы (С. Панчаратнам). Условие усложняется, резонанса И помимо динамической фазы, связанной с

распространением излучения по кольцу, добавляется геометрическая фаза. Таким образом, наличие геометрической фазы приводит к смещению резонансных длин волн оптического резонатора (И. Чен и др.).

В заключении делаются выводы по результатам проведенных исследований, изложенных в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненная работа посвящена исследованию поляризационно-оптических характеристик интегральных кольцевых резонаторов, изготовленных на основе X - среза тонкопленочного ниобата лития. В ходе работы были получены следующие результаты:

1. Разработаны и внедрены в российское программное обеспечение Difra программные модули для моделирования оптических волноводов и делителей мощности методом КРЧО и методом эффективного показателя преломления. Численная реализация комплексов программ и обработка полученных результатов были выполнены на языке программирования Python.

2. Найдены допустимые с точки зрения возможностей изготовления параметры поперечного сечения волноводов, определены зависимости эффективных

показателей преломления от длины волны, угла наклона боковых стенок волновода и глубины травления, вычислена степень поляризации фундаментальных мод.

3. Определен диапазон геометрических параметров поперечного сечения канальных волноводов из тонкопленочного ниобата лития Х-среза, в пределах которого применим метод эффективного показателя преломления для расчета оптических свойств фундаментальных мод.

Разработана модель 4. математическая И методика для расчета распределения излучения интенсивности И S-параметров многомодового интерференционного делителя с произвольным числом входных и выходных волноводов. Результаты расчета многомодового интерференционного делителя 1×2 на основе тонкопленочного ниобата лития, полученные с помощью разработанной модели, показали высокую степень согласованности с результатами метода распространяющегося пучка, максимальная разница в величине выходной мощности составила доли процента.

5. Установлен вид зависимости коэффициентов связи от параметров поперечного сечения волновода, материала покровного слоя и длины волны; выполнен расчет взаимной перекачки мощности между модами в кольцевом волноводе. Показано, что изменение угла наклона боковой стенки волноводов приводит к смещению длины волны, на которой наблюдается максимальная интенсивность ТМ-моды. При этом смещение происходит в длинноволновую область. Кроме того, на величину перекачиваемой между модами мощности сильно влияет материал покровного слоя. Когда в качестве покровного слоя был выбран SiO₂ максимальная интенсивность ТМ-моды достигала 8% от входной мощности ТЕмоды. В случае, когда сверху волновода был воздух, моды практически не обменивались мощностью (максимальная интенсивность ТМ-моды была около 0,7% от входной мощности ТЕ-моды).

Разработана модель анизотропного кольцевого резонатора на основе 6. теории связанных мод и метода матрицы передачи, а также метод расчета спектра резонатора. Разработан программный модуль для исследования оптических свойств Выполнена анизотропного кольцевого резонатора. валидация модели на экспериментальных результатах, опубликованных в литературе (А. Пан). Показано, что вдали от области гибридизации значения FSR, вычисленные с помощью разработанного метода, хорошо согласуются с экспериментальными данными, максимальная ошибка составляет 6 %. В области гибридизации наблюдается сильное несоответствие результатов модели и эксперимента, что может быть связано с влиянием геометрической фазы на условие резонанса в кольцевом резонаторе, так как ранее подобные эффекты наблюдались в волоконных и других кольцевых резонаторах.

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. $-2025. - T. 4. - N_{\odot}. 2. - C. 210-226.$ (**WoS, Scopus**)

2. **Moskalev D.**, Kozlov A., Salgaeva U., <u>Krishtop</u> V, Perminov A., Venediktov V. A Semi-Analytical Method for the S-Parameter Calculations of an N× M Multimode Interference Coupler //Photonics. $-2023. - T. 10. - N_{\odot}. 11. - C. 1260.$ (WoS, Scopus)

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. -T. 13. $-N_{2}$. 11. -C. 6374. (**WoS**, **Scopus**)

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. $-2023. - T. 13. - N_{\odot}. 4. - C. 2097.$ (WoS, Scopus)

5. Гилев Д.Г., Журавлёв А.А., Москалёв 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 (**WoS, Scopus**)

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. (РИНЦ)

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. – C. 180-184. (**Scopus**)

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

9. Салгаева У.О., Москалев Д.Н., Козлов А.А. Гибридное интегральнооптическое устройство// Патент на изобретение RU 2781367 C1, 11.10.2022. Заявка № 2021138654 от 24.12.2021 (Патент)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

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.

11. **Москалев Д.Н.,** Кондаков А.А. Программное средство для моделирования оптического волновода с переменной шириной. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681247, 10.11.2022. Заявка № 2022681094 от 10.11.2022.

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.

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.

14.МоскалевД.Н.,СалгаеваУ.О.Программадлямоделированияоптического волновода при заданном наборе длин волн.Свидетельство о регистрациипрограммыдляЭВМRU 2022681254,10.11.2022.Заявка № 2022681104 от 10.11.2022.

15. **Москалев Д.Н.**, Козлов А.А. Программа для определения критического радиуса кривизны при моделировании оптического волновода. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022681255, 10.11.2022. Заявка № 2022681105 от 10.11.2022.

 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.
 34
 2022681106 от 10.11.2022.
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 34
 <t

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.

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.