

На правах рукописи

Диваков Дмитрий Валентинович

**Численное решение задач волноводного распространения
поляризованного света в интегрально-оптическом волноводе**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Общая характеристика работы

В диссертации предложен и численно реализован подход к исследованию математических моделей, описывающих волноводное распространение поляризованного света в интегрально-оптических волноводах. В настоящее время имеется корректная математическая модель закрытого волновода, адекватно описывающая распространение электромагнитного излучения и его дифракцию на неоднородностях. Характерное отличие открытых волноводов от хорошо изученных закрытых состоит в том, что соответствующая спектральная задача на сечении содержит непрерывный спектр, который необходимо учитывать, как при постановке парциальных условий излучения, так и при дискретизации. Одна из возможностей такой дискретизации, указанная А.Г. Свешниковым, положена в основу модели интегрально-оптических волноводов, используемой в диссертации. Оптический волновод помещается в объемлющий его закрытый волновод («ящик», волновод с идеально-проводящими стенками). Это позволяет сформулировать корректную задачу, описывающую эволюцию волноводных мод как в полной электромагнитной постановке, так и в скалярном приближении, и использовать для ее расчета методы, разработанные для анализа закрытых волноводов.

Актуальность темы

Развитие векторной теории волноводного распространения света в нерегулярном интегрально-оптическом волноводе является одной из актуальных задач современной интегральной оптики и волноводной оптоэлектроники. Использование скалярной теории приближенно справедливо только для слабо направляющих структур и не подходит для описания волноводов, у которых сильно варьируется диэлектрическая проницаемость. В разнообразных устройствах сопряжения, связывающих различные элементы единой оптической интегральной схемы, ключевую роль играет согласование частот и синхронизация фаз электромагнитного поля в сопрягаемых элементах. Эффективность сопряжения существенно зависит от согласования между полями падающей волны и волноводной моды. Следовательно, чем точнее

известен вид согласуемых полей, тем успешнее будет решена задача эффективной передачи энергии через устройство сопряжения. Более того, при переходе в субмикронный диапазон линейных размеров элементов интегральных оптических устройств необходимо рассматривать задачу в векторной постановке. Требование к точности расчета параметров волноводной линзы и подобных элементов интегральных оптических структур при переходе в нанометровый диапазон сильно возрастает в связи с существованием ограничений, обусловленных дифракционными эффектами.

В этой связи проблема создания адекватных моделей волноводной дифракции поляризованного электромагнитного излучения в закрытых и открытых волоконно-оптических и интегрально-оптических нерегулярных и неоднородных волноводах является весьма востребованной проблемой. А формулировка корректных математических задач волноводной дифракции является необходимым условием реализации устойчивых численных методов решения задач волноводной дифракции поляризованного электромагнитного излучения.

Открытые и закрытые волноводные системы используются при решении различных практически важных задач весьма часто, но только для закрытых была предложена универсальная модель, учитывающая сложный векторный характер электромагнитного поля и парциальные условия излучения, ведущая к математически корректным постановкам задач анализа и синтеза (проектирование), и по этой причине вызвали теоретический интерес у специалистов по математической физике. Это обусловлено тем обстоятельством, что соответствующие спектральные задачи в закрытых системах имеют чисто дискретный спектр, а в открытых системах к нему добавляет еще и непрерывная составляющая. Открытые волноводные системы возникают на практике не менее часто, чем закрытые, более того, в некоторых предметных областях радиофизики и оптики им следовало бы отдать предпочтение, например, планарные волноводы используются только в оптическом диапазоне и только открытые. Практически реализованные

волноводы с компактным поперечным сечением бывают закрытыми (с металлическими стенками) в радиодиапазоне (дециметровом, сантиметровым и др.) и открытыми в оптическом диапазоне.

Постановка корректной задачи дифракции волн на неоднородности в закрытом волноводе использует парциальные условия излучения, предложенные в работах А.Г. Свешникова, обоснованию существования решения у этой задачи в различных волноведущих системах посвящена серия работ А.Н. Боголюбова, А.Л. Делицына и М.Д. Малых. Первый численный метод решения задач прохождения и дифракции волн вдоль закрытых нерегулярных волноводов был предложен в работах Б.З. Каценеленбаума и получил название метода поперечных сечений, работам Каценеленбаума предшествовали работы Краснушкина, Боровикова, Кисунько, Щелгунова, Стивенсона и др. Перечисленные модели не описывали деполяризацию направляемых мод на нерегулярных участках волноводов. Метод Каценеленбаума был модифицирован и осмыслен А.Г. Свешниковым как своеобразная реализация метода Галеркина и назван неполным методом Галеркина. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при решении задач дифракции в волноведущих системах со сложной геометрией и не менее сложным заполнением, в том числе киральным, что было показано в серии работ, выполненных под руководством А.Г. Свешникова на физическом факультете МГУ Боголюбовым А.Н., Быковым А.А., Ерохиным А.И., Делицыным А.Л., Могилевским И.Е., Моденовым В.П. и др.

Схожая конструкция, известная как метод Канторовича, используется при решении задач рассеяния частиц в квантовой механике в работах, выполненных под руководством С.И. Винницкого в ОИЯИ в Дубне А.А. Гусевым, О. Чулуунбаатаром и др. В скалярных задачах неполный метод Галеркина можно считать вариантом метода Канторовича.

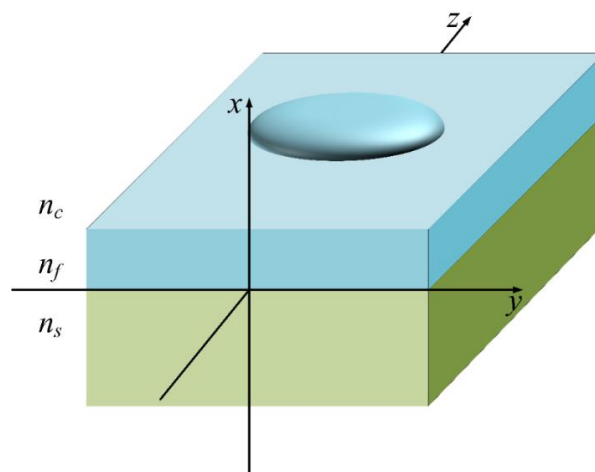
Метод Б.З. Каценеленбаума был обобщен на открытые плавно нерегулярные волноводы В.В. Шевченко. Этот метод пока не получил математического обоснования из-за наличия непрерывных частей спектра,

которые необходимо дискретизировать, прежде чем получить задачу, пригодную для численного решения. В работах В.С. Мележика и др. квантовомеханическая многоканальная задача рассеяния (в области непрерывного спектра на полуоси) численно решалась методом сведения к задаче на собственные значения.

Поэтому реализация идеи помещения открытой волноведущей системы в закрытую является весьма актуальной. Сформулированная нами на этой основе математическая модель реализует одну из таких дискретизаций и позволяет сформулировать корректную математическую задачу волноводной дифракции в плавно-нерегулярных интегрально-оптических волноводах.

Объект моделирования

Объектом теоретического рассмотрения и численного моделирования является класс интегрально-оптических волноводов на планарной регулярной диэлектрической подложке. Для определенности ограничимся рассмотрением тонкопленочных волноводов с плавной нерегулярностью.



В предположении, что поляризованное электромагнитное монохроматическое излучение распространяется в продольном горизонтальном направлении оси Oz декартовой системы координат, связанной с геометрией подложки, в большинстве примеров предполагаем нерегулярность волноводных слоев в вертикальном направлении Ox и регулярность в поперечном горизонтальном направлении Oy . В качестве

отступления будет рассмотрен класс тонкопленочных волноводных линз с нерегулярностью и в направлении Oy .

Такого рода структуры изготавливают несколькими технологическими процессами. Одни из них обеспечивают прочное удержание изготовленной волноводной пленки на подложке, другие – нет, их закрепляют покровным слоем для прочности изготовленной структуры. Способы изготовления интегрально-оптических элементов и устройств и возможные пути их использования в оптико-технических процессах обработки информации описаны в большом количестве источников во второй половине 20-го века. Ряд технологий приводят к созданию интегрально-оптических структур с диффузионными волноводными слоями, их называют градиентными волноводными структурами. Методы, развиваемые здесь, довольно легко обобщаются и на них.

Предмет исследования – математические модели распространения поляризованного света в плавно-нерегулярных интегрально-оптических волноводах.

В классе интегрально-оптических волноводных структур нерегулярных и в направлении Oy , и в направлении Oz , то есть двумерно-нерегулярных, необходимо рассматривать систему уравнений Максвелла, описывающую векторный характер распространяющегося света. В случае «очень слабой нерегулярности по y » можно использовать пару слабосвязанных уравнений Гельмгольца для описания слабо-гибридных волноводных мод со слабой деполяризацией.

Цель диссертационной работы

- исследование модели волноводной дифракции электромагнитного излучения в интегрально-оптическом волноводе, помещенном в объемлющий закрытый волновод;
- реализация символьно-численных алгоритмов решения задач волноводного распространения поляризованного света в рамках модели

волноводной дифракции электромагнитного излучения в интегрально-оптическом волноводе, помещенном в объемлющий закрытый волновод;

- верификация полученных результатов путем их сравнения с результатами, полученными в рамках более грубых моделей.

Задачи диссертационной работы

- постановка корректной математической задачи расчета электромагнитного поля в рамках модели волноводной дифракции электромагнитного излучения в интегрально-оптическом волноводе, помещенном в объемлющий закрытый волновод;
- адаптация численных методов и алгоритмов к решению сформулированной задачи;
- программная реализация численных методов и алгоритмов решения сформулированной задачи и проведение численных экспериментов в системах Maple, Sage;
- верификация результатов и оценка применимости исследуемой модели для решения задач волноводного распространения поляризованного света в рамках исследуемой модели.

Методы исследований

- *неполный метод Галеркина* решения задачи дифракции волноводной моды, падающей на двумерный неоднородный или нерегулярный закрытый волновод или волноводный переход между двумя закрытыми волноводами;
- *конечно-разностный метод* решения третьей краевой задачи с комплексными коэффициентами для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка;
- *асимптотический метод* решения дифференциальных уравнений с малым параметром, в приближении по которому векторная волноводная задача редуцируется к скалярной.

Научная новизна

Предложена новая постановка математической задачи, описывающей волноводное распространение поляризованного света в рамках модели волноводной дифракции электромагнитного излучения в интегрально-оптическом волноводе, помещенном в объемлющий закрытый волновод.

В диссертационной работе результаты и методы, обоснованные в теории закрытых волноводов, адаптируются к открытым волноведущим системам в рамках исследуемой модели.

Методы решения задач расчета электромагнитного поля реализованы в символьно-численном виде.

Практическая значимость

Модель, задачи дифракции, методы их решения и алгоритмы используются в учебном процессе при подготовке магистров направлений «Прикладная математика и информатика» и «Фундаментальная информатика и информационные технологии» в рамках курса «Вариационные методы в математическом моделировании». Программы, реализующие численные методы решения волноводных задач для двумерных волноводных структур можно использовать для верификации результатов расчета аналогичных структур в рамках других моделей и для решения прикладных задач.

Программы размещены в открытом доступе по адресу:
<https://bitbucket.org/DmitriyDivakov/waveguide/downloads/>

Основные положения, выносимые на защиту

- Предложена реализация идеи А.Г. Свешникова, указавшего на одну из возможных корректных постановок задач дифракции на неоднородностях в открытых волноведущих системах. Подробно описана приближенная математическая модель открытого волновода, теоремы существования, известные для закрытых систем, адаптированы к этой модели. Указан способ дискретизации парциальных условий излучения в задачах с непрерывным спектром. В частности, поставлены

задачи дифракции на микролинзе Люнеберга и ее плоском аналоге, а также задача о согласовании открытого волноводного перехода.

- Разработаны адаптированные символьно-численные алгоритмы расчета электромагнитных полей в рамках используемой модели.
- Разработанные алгоритмы реализованы в виде программ в системах Maple, Sage, которые могут быть использованы для верификации результатов расчета аналогичных структур в рамках других моделей и для решения прикладных задач.
- Используемая модели открытого волновода и основанные на ней методы расчета электромагнитных полей верифицированы путем сравнения с результатами, полученными в рамках известных моделей интегрально-оптических волноводов, обоснованных на физическом уровне строгости.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность результатов опирается на использование модели, учитывающей векторный характер распространения электромагнитного поля, показавшей свою эффективность при исследовании закрытых волноводов. Полученные математические задачи являются корректными. Системы линейных алгебраических уравнений, получаемые в результате конечно-разностной аппроксимации краевых задач, имеют блочно-трехдиагональную структуру матриц коэффициентов, блоки матриц коэффициентов обусловлены хорошо. Погрешность решения систем уравнений сравнима с компьютерной точностью. Достоверность вытекает из совпадения полученных результатов с результатами вычислений в рамках моделей, обоснованных на физическом уровне строгости.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Москва, МИФИ, 27 января – 01 февраля 2014 г.

- Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и информатики» (MPAMCS'2014). Дубна, 25 – 29 августа 2014 г.
- Всероссийской конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». Москва, РУДН, 22–25 апреля 2014 г.
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Москва, МИФИ, 16–20 февраля 2015г.
- Всероссийская конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». Москва, РУДН, 20–24 апреля 2015 г.
- Международная конференция «International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics» (MMCP'2015). StaraLesna, Словакия, 13–17 июля 2015 г.
- Всероссийская конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем». Москва, РУДН, 18–22 апреля 2016 г.
- IV Международная конференция «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование». Москва, НИЯУ МИФИ, 5–7 апреля 2016 г.
- Симпозиум международных научных конференций «Оптика и биофотоника IV» (SFM'2016). Саратов, СГУ, 27–30 сентября 2016 г.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах:

- Московский научный семинар «Интегральная оптика и волноводная оптоэлектроника» Московского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 7 декабря 2016г.
- Научный семинар «Проблемы современной математики», МИФИ, 2 марта 2017 г.
- Научный семинар «Математическое моделирование», РУДН, 15 марта 2017 г.

Публикации

Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ [1-4]. Всего по теме диссертационного исследования опубликовано 10 работ [1-10].

Личный вклад автора

Представленные в диссертационной работе результаты получены лично автором и состоят в следующем: автор диссертации, работая в коллективе соавторов, участвовал в разработке математической модели и корректной постановке задачи, включая парциальные условия излучения, и самостоятельно разработал все вычислительные схемы, алгоритмы, программы и тесты, представленные в диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 138 страниц с 50 рисунками. Список литературы содержит 162 наименования.

Основное содержание диссертации

Во **введении** приведены актуальность темы диссертационного исследования, цели и задачи работы, методы исследований, научная новизна, выносимые на защиту положения, обоснованность и достоверность полученных результатов, а также апробация работы. Приведен обзор основных результатов теории волноводной дифракции, обсуждаются результаты по нерегулярным открытым и закрытым волноводным структурам.

В **первой главе** диссертации дан обзор основных методов расчета закрытых волноводов, обсуждена возможность их перенесения на открытые волноведущие системы. Представлены простейшие модели интегрально-оптических волноводов, обоснованные на физическом уровне строгости и рассмотрена соответствующая спектральная задача, обладающая непрерывным спектром. Для закрытых волноводов описана задача волноводной дифракции и подробно описан метод поперечных сечений, предложенный Каценеленбаумом

Б.3. Приведена постановка корректной математической задачи волноводной дифракции с парциальными условиями излучения и метод ее приближенного решения – неполный метод Галеркина, предложенные Свешниковым А.Г. для закрытых волноводов. Приведены численные решения задачи в нерегулярных закрытых волноводах.

Сформулирован тезис о возможности перенесения результатов по неполному методу Галеркина на открытые волноведущие системы. Для открытых волноводных структур сформулирован метод поперечных сечений, предложенный Шевченко В.В., обобщающий метод поперечных сечений на класс интегрально-оптических волноводов. Приведены численные результаты.

Во **второй главе** диссертации приведено описание модели интегрально-оптического волновода, помещенного в объемлющий закрытый волновод. В рамках модели рассмотрены три волноведущие системы: планарный волновод с нерегулярностью в форме цилиндра постоянного сечения, планарный волновод с трехмерной неоднородностью (линза) и волноводный переход.

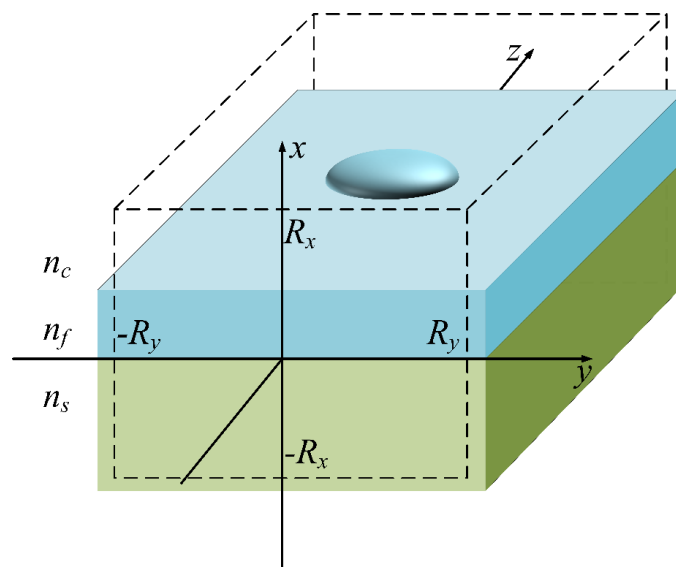


Рисунок 1. Плоский волновод, вставленный в ящик $R_x \times R_y$

Плоские поверхности раздела между волноводным слоем, подложкой и покровным слоем принимаются параллельными плоскости yOz . Ось Ox перпендикулярна этим плоским поверхностям, разделяющим три слоя: подложки, волноводного слоя и покровного слоя, характеризующихся различными коэффициентами преломления. На основной волноводный слой на

участке, размер которого имеет порядок нескольких длин волн излучения, нанесено небольшое утолщение – дополнительный волноводный слой. Задача отыскания электромагнитного поля и коэффициентов прохождения и отражения в скалярном приближении задача может быть сформулирована как

$$\begin{cases} \Delta u + k_0^2 q(x, y, z)u = 0, \\ u|_{x=\pm R_x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=\pm R_y} = 0, \\ u|_{z \leq -L} = \sum F_n v_n(x, y) e^{i\gamma_n z} + \sum R_n v_n(x, y) e^{-i\gamma_n z}, \\ u|_{z \geq L} = \sum F_n v_n(x, y) e^{i\gamma_n z} + \sum T_n v_n(x, y) e^{i\gamma_n z} \end{cases}$$

где F_n – заданные коэффициенты, характеризующие падающую волну, R_n, T_n – коэффициенты отражения и прохождения, v_n – собственные функции задачи

$$\begin{cases} \Delta_{\perp} v + k_0^2 q_0(x)v + \lambda v = 0, \\ v|_{x=\pm R_x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y}\Big|_{y=\pm R_y} = 0. \end{cases}$$

и $i\gamma_n = \sqrt{\lambda_n}$. Разрешимость этой задачи хорошо изучена в работах Делицина А.Л. и др.

Аналогичным образом ставятся математические задачи для планарного двумерного волновода с неоднородностью в форме линзы и волноводного перехода. В диссертации для поставленных задач сформулирован метод их приближенного решения – неполный метод Галеркина. Предлагается искать приближенное решение задачи в виде разложения по первым N функциям

полной в $L_2[-R_x, R_x]$ системы $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$: $u^N(x, z) = \sum_{n=1}^N V_n(z) \varphi_n(x)$, где

$\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ – собственные функции волноводных мод регулярного волновода, $V_n(z)$ – искомые коэффициентные функции. Подставляя такой вид решения в уравнение Гельмгольца и граничные условия и применяя проекционную схему неполного метода Галеркина, получаем третью краевую задачу:

$$\begin{cases} \vec{v}'' + \mathbf{Q}(z)\vec{v} = \vec{0} \\ \vec{v}'(0) + ik_0\mathbf{D}\vec{v}(0) = 2ik_0\mathbf{D}\vec{a}_{n_0}, \\ \vec{v}'(L) - ik_0\mathbf{D}\vec{v}(L) = \vec{0} \end{cases}$$

для решения которой предлагается использовать метод конечных разностей.

Третья глава посвящена численному исследованию модели волноводной дифракции электромагнитного излучения в интегрально-оптическом волноводе, помещенном в объемлющий закрытый волновод. Полученные в рамках модели собственные функции волноводных мод сравниваются с аналогичными собственными функциями модели открытого волновода – волновода с полубесконечными толщинами подложки и покровного слоя. Результаты совпали с относительной точностью порядка 10^{-12} .

Аппроксимируем дифференциальные операторы краевой задачи их разностными аналогами второго порядка точности на сетке с шагом $h = L / M$ и общим количеством узлов $M + 1$, в обозначениях $\vec{v}(z_j) = \vec{v}_j$, $\mathbf{Q}(z_j) = \mathbf{Q}_j$ и получаем систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{cases} \vec{v}_{j+1} - (2\mathbf{I} - h^2\mathbf{Q}_j)\vec{v}_j + \vec{v}_{j-1} = \vec{0}, & j = \overline{1, M-1} \\ \vec{v}_1 - \left(\mathbf{I} - ik_0h\mathbf{D} - \frac{1}{2}k_0^2h^2\mathbf{D}^2 \right) \vec{v}_0 = 2ik_0h\mathbf{D}\vec{a}_{n_0} \\ - \left(\mathbf{I} - ik_0h\mathbf{D} - \frac{1}{2}k_0^2h^2\mathbf{D}^2 \right) \vec{v}_M + \vec{v}_{M-1} = \vec{0} \end{cases}$$

с блочно-трехдиагональной матрицей коэффициентов. Блоки имеют размерность $N \times N$ где N – количество распространяющихся мод «ящика» ($N \sim 40$), число M при этом имеет порядок $M > 10^3$. Решаем полученную систему, учитывая структуру ее матрицы, а именно для решения применяем алгоритм матричной прогонки. Достаточный критерий устойчивости метода матричной прогонки для задачи с закрытым волноводом не выполняется, поэтому устойчивость метода оценивалась численно: на каждой итерации метода матричной прогонки обращается сумма матриц X_j , которая хорошо

обусловлена $1 < \text{cond}(X_j) < 1.074$ и обращается устойчиво для всех рассматриваемых задач. Относительная погрешность решения системы линейных алгебраических уравнений методом матричной прогонки составляет $\delta < 10^{-13}$.

В рамках описанной модели рассмотрены задачи волноводной дифракции в эквивалентных двумерных структурах, представляющих собой продольные разрезы волноводных линз на волноводном слое и внутри волноводного слоя, спроектированные методом поперечных сечений в одномодовом приближении для фокусировки моды TE_0 . Показано, что результаты для линзы на волноводном слое хорошо согласуются с аналогичными результатами одномодового приближения метода поперечных сечений. Показано также, что в случае линзы, расположенной внутри волноводного слоя, одномодовое приближение метода поперечных сечений дает недостаточно точный результат.

В задаче для двумерного плавного волноводного перехода поведение направляемых волноводных мод соответствует их поведению в рамках менее точного метода, учитывающего только направляемые моды.

В скалярной задаче для трехмерной волноводной линзы с помощью асимптотического метода исследовалась адекватность скалярного приближения: скалярное приближение по выбранному параметру адекватно описывает дифракцию на волноводных микролинзах.

Заключение

В заключении сформулированы **основные результаты работы:**

- Предложена корректная постановка задач дифракции на неоднородностях и нерегулярностях в открытых волноведущих системах: поставлены задачи дифракции на микролинзе Люнеберга и ее плоском аналоге, а также задача о согласовании открытого волноводного перехода.

- Разработаны символьно-численные алгоритмы решения поставленных задач на основе алгоритмов решения аналогичных задач для закрытых волноводов.
- Символьно-численные алгоритмы реализованы в виде программ в системах Maple, Sage.
- Результаты численных экспериментов, проведенных в рамках предложенной модели, сравниваются с результатами, полученными в рамках известных моделей интегрально-оптических волноводов, обоснованных на физическом уровне строгости.

Публикации по теме диссертации

1. Диваков Д.В., Севастьянов Л.А. Применение неполного метода Галеркина к нерегулярным переходам в открытых планарных волноводах // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27, № 7. – С. 44–50.
2. Divakov D.V., Sevastianov L.A., Nikolaev N.E. Modelling Open Transition of the “Horn” Type between Open Planar Waveguides // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 108. – Pp. 02020-p.1–02020-p.6.
3. Divakov D., Sevastianov L., Nikolaev N. Analysis of the incomplete Galerkin method for modelling of smoothly-irregular transition between planar waveguides // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 788, No. 1. – URL: <http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/788/1>.
4. Диваков Д.В., Малых М.Д., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. Моделирование распространения поляризованного света в тонкопленочной волноводной линзе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. – 2017. – Т. 25, № 1. – С. 56–68.
5. Диваков Д.В. Моделирование распространения собственных мод закрытого волновода неполным методом Галеркина // Современные проблемы прикладной математики и информатики (МРАМС’2014): тезисы докладов международной конференции. – Дубна: ОИЯИ, 2014. – С. 61–65.
6. Диваков Д.В. Неполный метод Галеркина в задаче моделирования локально-нерегулярных оптических волноводов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем:

- материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2014. – С. 225 - 227.
7. Диваков Д.В., Севастьянов Л.А. Применение неполного метода Галеркина в задачах моделирования волноведущих систем с локальной неоднородностью // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов: в 3 томах. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – Т. 2. – С. 43–47.
 8. Диваков Д.В., Тютюнник А.А. Применение метода Канторовича к задаче моделирования открытых волноводов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2015. – С. 263–264.
 9. Диваков Д.В., Севастьянов Л.А. Применение неполного метода Галеркина в задачах моделирования распространения собственных мод в нерегулярном волноводном переходе // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Аннотации докладов: в 3 томах. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – Т. 2. – С. 259.
 10. Диваков Д.В. Неполный метод Галеркина в задаче моделирования направляемых мод открытых нерегулярных волноводов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2016. – С. 242-245.

Аннотация

Диссертация посвящена исследованию волноводного распространения поляризованного света в интегрально-оптических волноводах. Характерное отличие открытых волноводов от хорошо изученных закрытых состоит в наличии непрерывного спектра, который необходимо учитывать при решении. Центральная идея, предложенная для моделирования дифракции в интегрально-оптических волноводах, состоит в помещении открытого волновода в объемлющий его закрытый волновод. Объемлющий закрытый волновод обладает только дискретным спектром, аппроксимирующим непрерывный спектр открытого волновода, что позволяет сформулировать корректную задачу с парциальными условиями излучения, описывающую волноводную дифракцию и использовать для ее решения методы, разработанные для анализа закрытых волноводов.

В работе используется неполный метод Галеркина, адаптированный к решаемой задаче и реализованный в символьно-численном виде в Maple и Sage для сведения задачи для уравнения Гельмгольца к краевой задаче для системы дифференциальных уравнений, которая далее решается конечно-разностным методом. В работе проведена верификация полученных результатов путем их сравнения с результатами более грубых моделей для открытых волноводов.

Abstract

The thesis is devoted to the study of waveguide propagation of polarized light in integrated optical waveguides. The characteristic difference between open waveguides and well-studied closed waveguides is the presence of a continuous spectrum, which must be taken into account in the solution. The central idea proposed for modeling diffraction in integrated optical waveguides consists in placing an open waveguide in the embracing closed waveguide. The embracing closed waveguide has only a discrete spectrum approximating the continuous spectrum of the open waveguide, which allows to formulate a correct problem with partial radiation conditions describing waveguide diffraction and to use for its solution the methods developed for the analysis of closed waveguides.

The paper uses the incomplete Galerkin method adapted to the problem being solved and implemented in symbolic numerical form in Maple and Sage for reducing the problem for the Helmholtz equation to the boundary value problem for a system of differential equations, which is then solved by the finite-difference method. Verification of the obtained results by comparing them with the results of coarser models for open waveguides was carried out.