

На правах рукописи

ГОЛОВАШКИН Димитрий Львович

**РАСЧЕТ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЛЬЕФЕ
МЕТОДОМ РАЗНОСТНОГО РЕШЕНИЯ
УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА**

Специальность 01.04.05 - Оптика

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Самара 2007

Работа выполнена в Самарском государственном аэрокосмическом университете
имени академика С.П. Королева и
Институте систем обработки изображений Российской академии наук

Научный консультант: член-корреспондент РАН В.А. Сойфер

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
Крыжановский Б.В.
доктор физико-математических наук, профессор Ивахник В.В.
доктор физико-математических наук, профессор Степанов С.А.

Ведущая организация: Самарский филиал Физического Института имени
П.Н. Лебедева РАН.

Защита состоится *2 ноября 2007г.* в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " " г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению задачи дифракции лазерного излучения на элементах микрооптики, основанному на разностных схемах для уравнений Максвелла, декомпозиции сеточной области, реализации параллельных вычислений и исследованию на этой основе алмазных поликристаллических дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и дифракционных решеток на торце волновода.

Актуальность темы.

Дифракционная компьютерная оптика развивается более 25 лет, начиная с основополагающих работ А.М. Прохорова, И.Н. Сисакяна и В.А. Сойфера. За прошедшие годы решены фундаментальные задачи фокусировки и селекции мод лазерного излучения, формирования бездифракционных пучков и т.п. Созданные ДОЭ нашли широкое применение в лазерных технологических установках, оптических приборах и устройствах хранения и поиска информации. Количество публикаций по данной тематике отечественных и зарубежных авторов к настоящему времени весьма велико и продолжает бурно расти. В силу этого тематика работы является актуальной в широком смысле.

Необходимо отметить тенденции к миниатюризации ДОЭ и их интеграции с другими оптическими или электронными компонентами различных устройств. Кроме улучшения массогабаритных характеристик, миниатюризация позволяет использовать для изготовления ДОЭ материалы, применение которых при производстве элементов рефракционной оптики либо невозможно, либо связано со значительными техническими трудностями и финансовыми затратами. Миниатюризация приводит к уменьшению линейных размеров зон Френеля на ДОЭ и выдвигает соответствующее требование субволнового разрешения технологических установок, применяемых для их создания. При этом методы расчета, основанные на геометрическом и скалярном приближениях, становятся неадекватными, что приводит к постановке задачи решения уравнений Максвелла в векторной форме и обуславливает актуальность основного направления данной работы – расчета дифракции лазерного излучения в рамках строгой электромагнитной теории. В частности, дифракции на алмазных поликристаллических пленках (впервые примененных в 1999 году Коновым В.И., Кононенко В.В., Павельевым В.С. и Сойфером В.А. для формирования ДОЭ) с нанесенным субволновым микрорельефом.

Интеграция элементов микрооптики открывает широкие возможности для создания гибридных оптических структур, сочетающих достоинства ДОЭ и элементов традиционной оптики. Примером тому может служить формирование фокусатора в прямоугольник на торце кварцевого волновода (Prasciolu M., Sojoc D., Cabrini S и др., 2003 г.). С развитием исследований в данном направлении связано нанесение светоделительной дифракционной решетки на торец галогенидного ИК-волновода, произведенное в 2005 году Волковым А.В., Павельевым В.С. и Моисеевым О.Ю. Совмещение ДОЭ и волновода позволяет снизить потери на френелевское отражение (показатель преломления материала волновода $n=2,15$) и избежать юстировки объединенной оптической системы. Следовательно, актуально изучение распространения света через дифракционную решетку,

сформированную на торце галогенидного ИК-волновода – также требующее применения строгой теории дифракции в силу субволнового профиля решетки.

Развитие микротехнологии позволяет создавать ДОО технологическими автоматами с субволновым разрешением. Однако, несовершенства технологий приводят к отклонению получаемых характеристик дифракционного микрорельефа от расчетных. Учетом влияния технологических погрешностей изготовления на работу дифракционных микролинз и бинарных решеток из оптического стекла ($n=1,5$) занимались Волков А.В., Скиданов Р.В., 2000; Скиданов Р.В., Хонина С.Н., 2004; Досколович Л.Л., Тявин Е.В. 2005 г, оставаясь, однако, в рамках геометрической и скалярной оптики.

Метод абляции, применяемый для формирования микрорельефа на поликристаллических алмазных пленках, характеризуется наличием технологических погрешностей на стыке элементарных областей микроstructuring, имеющих субволновые линейные размеры. Изучение влияния таких погрешностей на формирование дифракционной картины за оптическим элементом ранее не проводилось, что делает эту задачу актуальной.

Нанесение светоделительной дифракционной решетки на торец галогенидного ИК-волокна сопровождается изготовлением матрицы решетки посредством химического травления и штамповкой рельефа. Каждому технологическому этапу присущи свои погрешности, влияющие на работу дифракционной решетки, которые ранее не исследовались.

Обобщая сказанное и обращаясь к главной части разрабатываемого метода решения уравнений Максвелла, подчеркнем фундаментальность используемой модели, применение которой лежит в основе решения многих перспективных задач лазерной оптики.

Появившись в середине прошлого века (G. Cron, 1944 год), разностный метод решения уравнений Максвелла прошел несколько стадий развития. Ранее всего (S.K. Yee 1966 год) были записаны разностные уравнения, обладающие высокими порядками аппроксимации исходной дифференциальной задачи по времени и пространству. Однако, предложенные S.K. Yee явные схемы характеризуются условной устойчивостью, в силу чего актуальна задача разработки безусловно устойчивых разностных схем для уравнений Максвелла.

Десять лет назад J.-P. Berenger удовлетворительно решил проблему численного описания поглощения излучения, покидающего границы вычислительной области. Однако расположение поглощающих слоев в вычислительной области и традиционные граничные условия препятствует успешной векторизации вычислений по методу. Актуальна разработка новой компоновки поглощающих слоев в вычислительной области.

Задача моделирования работы источника падающей волны, поставленная еще Yee в 1966 г., решается с разной точностью вплоть до настоящего времени. Первый способ задания падающей волны, позволяющий ограничить вычислительную область исследуемым объектом и его ближайшей окрестностью, был сформулирован в 1975 году (Taflove A., Brodwin M.). Более точный метод опубликован в 1980 году (Taflove A.) в рамках TF/SF методики (Total-Field/Scattering-Field technique). С повышением точности данного подхода в области, заключенной в оболочку из однородной среды, связана работа 1999 года (D.W. Prather, S. Shi), авторы которой предпочли задавать падающую волну численно, вместо

аналитической формы, как это ранее предлагалось. Однако, при моделировании работы дифракционных оптических элементов конструирование такой оболочки приводит к многократному росту вычислительной сложности алгоритма, так как в расчетную область приходится помещать весь оптический элемент. В силу чего актуальна адаптация методики задания падающей волны для решения задач дифракционной оптики.

Расплатой за универсальность метода разностного решения уравнений Максвелла является его высокая вычислительная сложность, обуславливающая актуальность декомпозиции сеточной области и составления параллельных алгоритмов решения разностных уравнений.

Прием декомпозиции хорошо известен применительно к уравнению теплопроводности (Самарский А.А., Вабищевич П.Н., 2003), в силу чего актуальна его адаптация для уравнений Максвелла.

Параллельные алгоритмы решения явных разностных схем Yee (Perlik A.T., 1989) широко используются, однако алгоритмы вычислений по неявным схемам разработаны лишь в самом общем виде (монографии Голуба Дж., Ван Лоуна Ч., 1999 и Ортеги Д.М., 1991), без учета специфики задачи дифракции на ДОЭ. Решение этой задачи представляется актуальным.

Целью работы является решение задачи дифракции лазерного излучения на элементах микрооптики с применением разностных схем для уравнений Максвелла, декомпозиции сеточной области, реализацией параллельных вычислений и исследование на этой основе алмазных поликристаллических ДОЭ и дифракционных решеток на торце волновода.

В соответствии с поставленной целью определены основные задачи диссертации:

1. Создание математических методов и алгоритмов для проведения вычислительных экспериментов, обеспечивающих исследование дифракции лазерного излучения на элементах микрооптики; в том числе: внутри оптического элемента; на ДОЭ с высокой числовой апертурой; на ДОЭ, сформированных на диэлектрических и проводящих материалах.

2. Анализ погрешностей формирования дифракционных решеток на торце ИК-волновода и их влияния на оптические характеристики решетки.

3. Исследование прохождения света через микрорельеф ДОЭ на алмазных пленках с технологическими погрешностями изготовления и разработка методов уменьшения влияния таких погрешностей.

4. Сокращение вычислительных затрат при расчете дифракции электромагнитных полей по разностным схемам посредством декомпозиции сеточной области.

5. Синтез параллельных алгоритмов для реализации вычислений по неявным разностным схемам при решении задачи дифракции на оптическом микрорельефе.

Научная новизна работы.

1. Для расчета дифракции на субволновом оптическом микрорельефе предложены неявные разностные схемы для уравнений Максвелла, отличающиеся от явных схем Уее способом выражения сеточных функций.

2. Предложена универсальная сеточная область с циклическими граничными условиями и тремя объединенными поглощающими слоями, вместо трех стандартных сеточных областей с электрической и магнитной стенками на границе, циклическими условиями и восьмью поглощающими слоями. Универсальная сеточная область позволяет моделировать распространение лазерного излучения через дифракционные решетки с неограниченной апертурой и оптические микроэлементы с ограниченной апертурой, и допускает применение эффективных векторных алгоритмов решения разностных уравнений.

3. Разработаны методы задания падающего поля в рамках технологий TF/SF и TFF, отличающиеся от ранее известных расположением границы разделения полей и более точным учетом отраженной от ДОЭ волны, что позволяет от 3 до 5 раз снизить погрешность вычислительного эксперимента.

4. Численно исследовано влияние технологических погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода (перетрав/недотрав канавки профиля, образование клина травления, прогиб профиля при штамповке) на распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам. Показано, что наибольшее искажение в дифракционную картину (в несколько раз превышающее влияние остальных технологических погрешностей) вносит клин травления, уводя из рабочих порядков до четверти энергии падающей волны. Даны рекомендации о применении иной технологии для формирования матрицы штамповки, что позволяет снизить на 25% потери энергии в рабочих порядках.

5. Проведено численное сравнительное исследование дифракционной картины внутри и вне профиля дифракционных цилиндрических микролинз с апертурой в несколько длин волн. Подтвержден эффект падения интенсивности в области фокусировки, наблюдающийся при уменьшении числа уровней квантования, ранее известный для микролинз с апертурой в несколько сотен длин волн.

6. Изучено влияние погрешностей технологии абляции алмазной поликристаллической пластины на формирование заданного распределения интенсивностей за изготовленным оптическим элементом и его локальными фрагментами. Обоснована целесообразность применения технологии, характеризующейся перекрытием областей абляции при формировании элементарных площадок структурирования.

7. Для решения задачи дифракции на элементах микрооптики посредством конечных разностей, развит метод декомпозиции сеточной области, позволяющий в сочетании с приемом разложения на плоские волны в подложке ДОЭ в несколько раз сократить затраты времени.

8. Предложены параллельные алгоритмы решения неявных разностных уравнений, отличающиеся от классических методов декомпозиции ленточной матрицы и циклической редукции применением встречных прогонок, линейным (для ДОЭ с ограниченной апертурой) и циклическим (для ДОЭ с неограниченной апертурой) разбиением сеточной области, позволившие многократно сократить время моделирования процесса дифракции.

На защиту выносятся:

- неявные разностные схемы для уравнений Максвелла, основанные на методах расщепления и переменных направлений;
- компоновка поглощающих слоев и постановка граничных условий, обеспечивающие построение универсальной сеточной области и эффективную векторизацию решения разностных уравнений при исследовании оптических элементов с бесконечной и ограниченной апертурами;
- два метода задания падающей на ДОО волны: основанные на использовании вспомогательных одномерных задач и разделении полей;
- результаты исследований технологических погрешностей нанесения дифракционного микрорельефа на торец галогенидного ИК-волновода и анализ их влияния на распределение интенсивностей дифракционных порядков за торцом;
- результаты моделирования дифракции света на микролинзах с высокими числовыми апертурами в рамках строгой теории дифракции;
- результаты исследования влияния технологических погрешностей формирования микрорельефа методом абляции алмазной поликристаллической пластины на дифракционную картину за алмазным элементом;
- метод декомпозиции сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла, основанный на учете локально устоявшегося поля и принципе суперпозиции;
- параллельные алгоритмы решения неявных разностных уравнений, основанные на методе встречных прогонок, линейном и циклическом разбиениях вычислительной области.

Практическая ценность работы.

Практическую значимость имеет разработанный разностный метод решения уравнений Максвелла, позволяющий моделировать распространение электромагнитного излучения через ДОО; в том числе через элементы с высокой числовой апертурой, внутри ДОО (изготовленных из различных материалов).

Применение предложенных параллельных алгоритмов решения неявных разностных уравнений позволяет повысить ускорение вычислительного процесса при решении задачи дифракции на ДОО.

Практическая ценность проведенных в диссертационной работе исследований также заключается в рекомендациях по совершенствованию двух технологий формирования дифракционного микрорельефа: 1) штамповки ДОО на торце галогенидного ИК-волокна, 2) абляции алмазной поликристаллической пластины. Предложенные рекомендации позволят повысить дифракционную эффективность элементов на торце галогенидного ИК-волокна и алмазных оптических элементов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: VIII Всероссийское совещание по проблемам построения сеток для решения задач математической физики (Абрау-Дюрсо, 1998г.); IX Межвузовская конференция "Математическое моделирование и краевые задачи" (г. Самара, 1999 г.); Международная конференция "Diffraction Optics" (г. Йена, Германия, 1999 г.); VI Международная конференция "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ" (г. Самара,

1999г.); Международная школа для молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофизике (г. Саратов, 1999 г.); Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике (г. Иркутск, 1999 г.); Всероссийская научная конференция "Высокопроизводительные вычисления и их приложения" (г. Черноголовка, 2000 г.); Международная конференция "Математическое моделирование - 2001" (г. Самара, 2001 г.); Международный симпозиум "Optical Science and Technology" (США, г. Сан-Диего, 2003); Международная конференция "Science and computing" (г. Москва, 2003г.); Конференция «Photon Management» международного симпозиума "Photonics Europe" (Франция, г. Страсбург, 2004 г.); Четвертый международный научно-практический семинар и Всероссийская молодежная школа «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (г. Самара, 2004 г.); II Международная научная конференция "Сетевые компьютерные технологии" (Беларусь, г. Минск, 2005 года); Конференция «Photon Management II» международного симпозиума "Photonics Europe" (Франция, г. Страсбург, 2006 г.); Международная конференция "Laser Beam Shaping VII" (США, г. Сан-Диего, 2006); Международная конференция ICO "Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics" (г. Санкт-Петербург, 2006 г.); Международный Российско-Китайский семинар по дифракционной оптике (КНР, г. Сиань, 2007 г.); Всероссийская научная конференция с международным участием "Математическое моделирование и краевые задачи" (г. Самара, 2007 г.).

Связь с государственными и международными программами

Работы по теме диссертаций проводились при поддержке грантов Президента Российской Федерации (МК-2568.2005.9) и РФФИ, Российской академии наук (программы Президиума РАН "Математическое моделирование и интеллектуальные системы", "Поддержка молодых ученых"), программы фундаментальных научных исследований Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН "Новые физические и структурные решения в инфотелекоммуникациях", федеральной целевой научно-технической программы Федерального агентства по науке и инновациям "Исследования по приоритетным направлениям науки и техники на 2002-2006 годы", ведомственной научной программы Федерального агентства по образованию "Развитие научного потенциала высшей школы" и российско-американской программы "Фундаментальные исследования и высшее образование" ("BRHE").

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 3-х монографиях и 47 основных научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, Приложения, списка использованных источников из 214 наименований. Содержит 276 страниц, 78 рисунков, 41 таблицу.

Содержание работы

Во Введении обсуждается задача распространения света через оптический микрорельеф, для решения которой необходимо привлечение строгой теории дифракции. Дан анализ методов строгой теории дифракции, прослежена эволюция развития разностного подхода к решению уравнений Максвелла. Обоснована актуальность, показана научная новизна работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, описана структура и приведено краткое содержание диссертации.

В первой Главе приводится математический аппарат, используемый для решения задачи дифракции на оптическом микрорельефе.

Для исследования ДОО с субволновыми размерами характеристических неоднородностей, при которых приближения геометрической и скалярной оптики теряют адекватность, предлагается применение строгой теории дифракции, основанной непосредственно на решении уравнений Максвелла. Эти уравнения и составляют основу представленной в первой Главе математической модели дифракции на ДОО. Для записи уравнений Максвелла выбирается декартова система координат, в которой наиболее естественно описывается квантованный ступенчатый микрорельеф ДОО.

Рассмотрению подлежат одномерные и двумерные задачи дифракции, соответствующие прохождению Т-волны (падающей по нормали к границам раздела) через слоистые среды и распространению через цилиндрические оптические элементы волны типа Н. Моделирование процесса дифракции в одномерном случае производится либо для верификации численного решения, либо используется при задании падающей на цилиндрический оптический элемент волны (или волны, отраженной от него).

Материальные уравнения записываются в предположении, что оптический элемент освещается монохроматическим излучением, а процессы в среде считаются линейными, локальными и безынерционными. Сама среда выбирается немагнитной.

Разностное решение уравнений Максвелла связывается с постановкой граничных и начальных условий, наложением сеточной области, записью разностных уравнений и заданием падающей волны.

Под граничными условиями предлагается понимать не соотношения напряженностей и индукций на границах оптического элемента (как это принято в электродинамике), а выражения, задаваемые на краях вычислительной области. При этом оптический элемент задается функцией диэлектрической проницаемости. Предлагается отказаться от традиционного использования электрической и магнитной стенок, всегда задавая на краях области циклические граничные условия.

В случае исследования ограниченного оптического элемента указанный прием позволяет произвести объединение восьми слоев (рис. 1а), поглощающих по направлениям Y (слои 1,2,3), $-Y$ (слои 5,6,7) и Z (слои 3,4,5), $-Z$ (слои 1,7,8) в три (рис. 1б): слои В и С поглощающие излучение, распространяющееся по направлению Y и $-Y$, слои А, В – по Z и $-Z$. Такие слои не позволяют рассеянному

полно вернуться в область вычислительного эксперимента и исказить дифракционную картину.

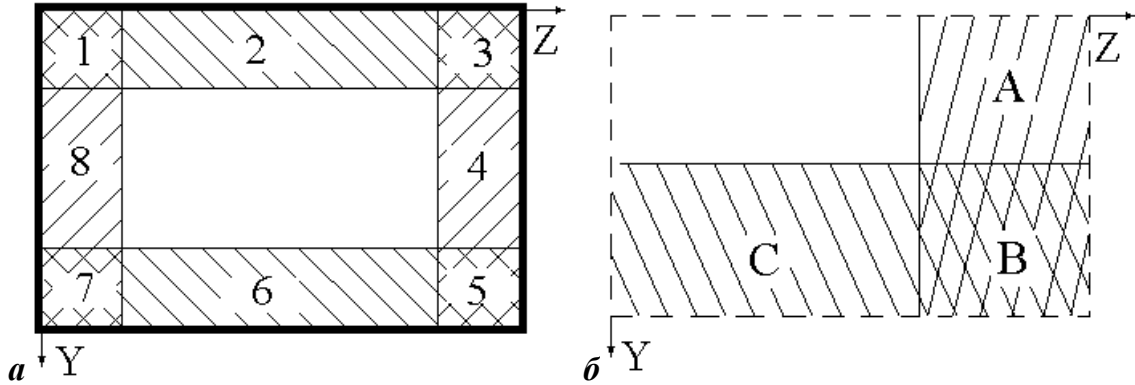


Рис. 1 Переход от вычислительной области с восемью поглощающими слоями и электрической стенкой на границе (случай *а*, электрическая стенка изображена толстой линией) к области с циклическими граничными условиями и тремя поглощающими слоями (случай *б*, циклические условия нанесены пунктиром).

Переход от традиционной вычислительной области, изображенной на рис. 1а, к области на рис. 1б производится смещением начала координат в центр слоя В. Такое смещение возможно в силу цикличности граничных условий и сопровождается переносом электрических стенок в середину слоев А,В,С. Располагаясь в толще поглощающих слоев стенки не будут оказывать влияние на формирование дифракционной картины и могут быть удалены (рис. 1б).

Достоинством предложенного перехода признается универсальность новой вычислительной области. С ее помощью (в отличие от области, представленной на рис. 1.а) возможно моделирование не только ограниченных, но и бесконечных (пусть по направлению Y) периодических ДОЭ. Для этого обнуляются соответствующие электрические проводимости в слоях С и В, после чего поглощение по Y и $-Y$ становится невозможным, а циклические условия ограничивают один период изучаемого элемента. При моделировании симметричного ограниченного оптического элемента ось симметрии располагается в середине слоев С и В (вдоль направления Z); проводимости в верхней части этих слоев обнуляются, а на ось накладывается магнитная стенка. Аналогично для симметричного неограниченного оптического элемента. Ось симметрии располагается в середине слоев С и В (вдоль направления Z); обнуляются проводимости в верхней и нижней части указанных слоев, а на ось накладывается магнитная стенка.

Подчеркивается возможность более удачной векторизации вычислений на новой области. Так, если минимальный размер вектора, состоящего из значений сеточных функций, ранее задавался толщиной необъединенных поглощающих слоев, то после объединения эта величина возросла вдвое. Как известно, эффективность векторизации возрастает с увеличением длины векторов. Для области, размерами $4\lambda \times 4\lambda$ (λ - длина волны) при толщине необъединенных слоев в λ , переход к области с объединенными слоями позволил на четверть снизить длительность вычислений, производившихся в среде Matlab 7.0 на процессоре AMD Opteron 244.

За начальное условие предлагается принимать отсутствие поля в вычислительной области в начальный момент времени. Не рекомендуется задавать поле

аналитически в тех случаях, когда его формирование в части вычислительной области до начала вычислений возможно (например, дифракцию падающей волны в свободном пространстве до оптического элемента можно рассчитать заранее). Это приведет к снижению точности вычислительного эксперимента в силу неполного согласования аналитического и численного решений.

Для повышения устойчивости разностных схем разработаны неявные разностные уравнения, характеризующиеся выражением сеточных функций на следующем слое по времени не только через функции на предыдущем слое (как в традиционной явной схеме Yee), но и посредством функций, определенных в соседних узлах по пространству.

Построение неявных схем производится методами покоординатного расщепления и переменных направлений. Первый подход связан с представлением о раздельном распространении электромагнитной волны на каждом временном слое сначала по направлению Y , затем по Z . В результате три дифференциальных уравнения (случай распространения H -волны) аппроксимируются четырьмя сеточными: двумя неявными, выражающими электрическое поле, и двумя явными - для выражения магнитного через найденное электрическое.

Метод переменных направлений также подразумевает двухэтапный переход к следующему временному слою, при этом распространение на каждом этапе моделируется по обоим направлениям - Y и Z . Первое разностное уравнение для выражения электрического поля является неявным по Y и явным по Z . Второе наоборот, явным по Y и неявным по Z . Уравнения для нахождения магнитного поля остаются явными. Добавление явной части в уравнения, из которых выражается электрическое поле, приводит к увеличению порядка аппроксимации по времени.

Особое внимание уделяется методам задания падающей волны. Различаются два подхода к решению этой задачи. Первый (TF/SF методика) связывается с разделением электромагнитного поля (рис. 2а) на результирующее (в подобласти оптического элемента) и рассеянное (в расположении поглощающих слоев). Такой подход реализуется записью на границе раздела полей разностных уравнений, содержащих напряженности падающего электрического и магнитного полей. Аналитическое задание падающей волны приводит к увеличению погрешности вычислительного эксперимента. Для случая расположения оптического элемента в вычислительной области целиком, известна более совершенная методика численного задания (D.W. Prather, S. Shi, 1999 г.) падающей волны, основанная на решении вспомогательной одномерной задачи распространения T -волны в вакууме. Напряженности полей, рассчитанные во вспомогательной задаче, используются при моделировании дифракции на ДОЭ в качестве напряженностей падающей волны.

При исследовании дифракционных оптических элементов признается удобным исследовать дифракцию на микрорельефе, исключая из рассмотрения подложку. Тогда длительность моделирования снижается пропорционально отношению толщины элемента к высоте дифракционного микрорельефа.

Таблица 1. Погрешности моделирования распространения электромагнитного поля при реализации различных методик формирования падающей волны в рамках подхода, предусматривающего разделение полей. Параметры дискретизации

сеточной области (Q, Q_t) соответствуют количеству отсчетов, приходящихся на одну длину волны (λ) по пространству и числу узлов во временной области, разбивающих интервал, за который плоская электромагнитная волна проходит в вакууме расстояние равное λ .

(Q, Q_t)	способы задания падающей волны		
	TF/SF, аналитический	TF/SF, численный	TF/RF, численный
10/20	13,9267	12,3299	4,387
20/40	4,3193	3,8751	0,9745
50/100	1,4352	1,3202	0,1515
100/200	1,2614	1,1947	0,0383

Применение двух вспомогательных задач позволяет снизить погрешность вычислительного эксперимента (Табл. 1, третий столбец) при моделировании распространения волны через границу раздела диэлектрик ($n=1,5$)/вакуум.

Первая вспомогательная задача используется для задания падающего поля в диэлектрике, вплоть до границы раздела сред, вторая – в вакууме, начиная с этой границы. Однако, фазы полей двух задач на границе раздела согласовываются аналитически, что делает методику не вполне численной и приводит к незначительному уменьшению погрешности по сравнению с полностью аналитическим решением (Табл. 1, второй столбец).

Наложение сеточной области с циклическими краевыми условиями (рис. 1б) позволяет при задании падающей волны не заключать оптический элемент в оболочку, образованную границей разделения результирующего и рассеянного полей, а разделять поля на результирующее и отраженное (методика TF/RF).

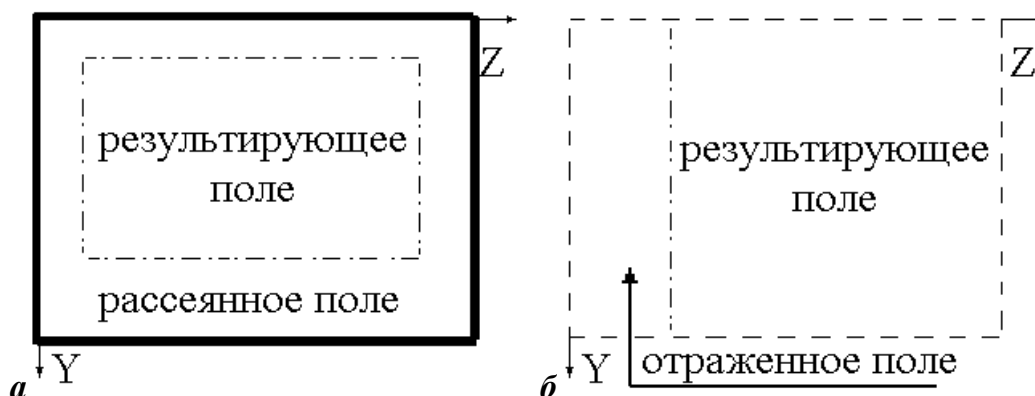


Рис. 2. Разделение полей в методике TF/SF (случай а) и TF/RF (случай б). Граница раздела нанесена штрих-пунктирной линией.

При этом граница такого раздела представляет собой отрезок, параллельный оси Y и расположенный до оптического элемента (рис. 2б).

Реализация методики TF/RF связана с решением одной вспомогательной задачи (моделирование распространения Т-волны в однородном диэлектрике) и характеризуется повышением точности задания падающей волны (Табл. 1, четвертый столбец). Кроме того, снижается вычислительная сложность задания в силу сокращения протяженности границы раздела полей. При исследовании

распространения излучения в волноводах, вытянутых вдоль оси Z , упомянутое снижение будет особенно заметным.

Продемонстрирована невозможность строгого следования концепции TF/SF. При аналитическом задании падающей волны неизбежно появление всплеска модуля комплексной амплитуды напряженности поля за правой границей разделения (рис. 3).

Наблюдаемый всплеск объясняется временной задержкой, необходимой излученной на левой границе разделения волне для достижения правой границы. В течение этого времени волна, излученная на правой границе, распространяется в направлении Z .

Численная постановка падающей волны в методике TF/SF позволяет исправить это несоответствие. Однако, переход от исследования распространения излучения в свободном пространстве (случая, полезного для верификации разностного решения) к дифракции на ДОЭ, опять связан с нарушением принципа разделения полей. В этом случае причиной нарушения служит временная задержка, вызванная уменьшением скорости распространения волны в материале ДОЭ по сравнению со свободным пространством.

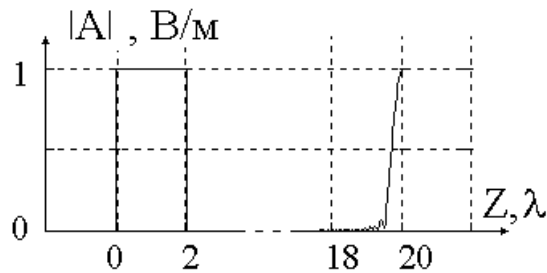


Рис. 3. Распределение модуля комплексной амплитуды электрического поля ($|A|$) в области результирующего ($0 \leq z \leq 2\lambda$) и рассеянного ($z < 0$ и $z > 2\lambda$) полей при распространении Т-волны в вакууме.

Второй подход к заданию падающей волны не характеризуется разделением полей: во всей вычислительной области присутствует только результирующее поле (TFF методика). При переходе к новому слою по времени предлагалось (Taflove A., Brodwin M., 1975 г.) определять результирующее поле в области задания падающей волны как сумму напряженностей электрических компонент такой волны (задаваемую аналитически) и результирующего поля (определенного на предыдущем временном слое). Результаты моделирования распространения Т-волны в свободном пространстве по предложенному правилу представлены во втором столбце Табл. 2.

Для повышения точности развиваемого подхода представлен иной способ перехода к следующему временному слою в области задания падающей волны. При этом используется решение вспомогательной задачи, отличающейся от основной отсутствием оптического элемента и, как следствие, отсутствием отраженной от него волны.

Таблица 2. Погрешности моделирования распространения электромагнитного поля при реализации двух вариантов методики TFF.

(Q, Q _t)	способы задания падающей волны	
	TFF, первый вариант	TFF, “прозрачный” источник
10/20	8,4609	1,3948
20/40	2,2177	0,1023
50/100	0,3741	0,0369
100/20 0	0,1019	0,0104

Тогда отраженную волну можно найти как разность результирующих полей основной и вспомогательной задач. Результирующее поле на новом временном слое в основной задаче задается сложением известной (аналитически выраженной) падающей волны и найденной отраженной. Предложенный метод получил название “прозрачного” источника, при котором, в отличие от “жесткого” источника (hard source, Taflove A., Hagness S., 1995 г.), отраженная от ДОО волна, возвращаясь к области задания падающего поля, не испытывает дополнительного переотражения.

Показано, что применение “прозрачного” источника при задании падающей волны не сопряжено со снижением точности моделирования: погрешности вычислительных экспериментов совпали с погрешностями, вызванными заменой производных разностными отношениями и наложением поглощающих слоев (Табл. 2, третий столбец). Таким образом, в первоначальной формулировке методики TFF (Taflove A., Brodwin M., 1975 г.) за отраженную волну фактически принималась результирующая, что приводило к появлению дополнительной погрешности (Табл. 2, второй и третий столбцы).

Представлено сравнение изложенных подходов TF/RF и TFF (на примере лучших модификаций) к заданию падающей волны. Показано, что оба не вносят дополнительной погрешности в результаты моделирования (за счет численного задания падающей либо отраженной волны), однако второй характеризуется меньшей вычислительной сложностью в силу того, что оперирует только электрическим полем, не нуждаясь в определении магнитного.

Предложенный в первой Главе метод разностного решения уравнений Максвелла позволяет проводить моделирование дифракции электромагнитной волны на оптическом микрорельефе с учетом особенностей формирования ДОО и характеризуется большей точностью по сравнению с известными аналогами.

Во второй Главе методом вычислительного эксперимента проведено исследование влияния технологических погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода на распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам.

Основной материал главы предваряют результаты верификации разностного решения уравнений Максвелла для случая распространения электромагнитного излучения через периодические дифракционные решетки с неограниченной апертурой.

Исследование дифракции на бинарной идеально проводящей решетке с периодом $2,5\lambda$, шириной канавки $1,25\lambda$ и глубиной профиля λ при $\lambda=1$ мкм проводилось модальным и разностным методами. Результаты сравнения решений задачи

дифракции представлены в Табл. 3 и свидетельствуют о допустимости применения изложенного в первой Главе математического аппарата при исследовании идеально проводящих решеток.

Таблица 3. Результаты расчета дифракции на бинарной идеально проводящей решетке модовым методом и методом разностного решения уравнений Максвелла.

интенсивности дифракционных поряд- ков отраженной волны	метод моделирования	
	модовый	разностный
J_0	0,6753	0,6824
$J_1=J_{-1}$	0,1093	0,1064
$J_2=J_{-2}$	0,053	0,05205

В отличие от модового метода, разностный подход к решению уравнений Максвелла позволяет проводить моделирование идеально проводящих решеток произвольного профиля. Представлены результаты расчета дифракции на отражающих пилообразных решетках и пропускающих амплитудных треугольных решетках.

Для верификации на примере диэлектрической решетки привлекался метод связанных волн. Тестовая решетка характеризовалась теми же геометрическими размерами, что и предыдущая, показатель преломления материала задавался как $n=1,5$. Приведенные в Табл. 4 результаты моделирования подтверждают состоятельность разностного решения и в этом случае.

Таблица 4. Результаты расчета дифракции на бинарной диэлектрической решетке методом связанных волн и методом разностного решения уравнений Максвелла.

интенсивности дифракционных поряд- ков прошедшей волны	метод моделирования	
	связанных волн	разностный
I_0	0,0552	0,05577
$I_1=I_{-1}$	0,3498	0,36845
$I_2=I_{-2}$	0,0756	0,07484

Недостатком метода связанных волн признается неустойчивость процедуры обращения плохо обусловленной матрицы, возникающей при решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Регуляризация алгоритма приводит к нахождению псевдорешения системы, сходимость которого с ростом количества коэффициентов разложения функции диэлектрической проницаемости в ряд Фурье не гарантируется. Разностный метод решения уравнений Максвелла свободен от такого недостатка.

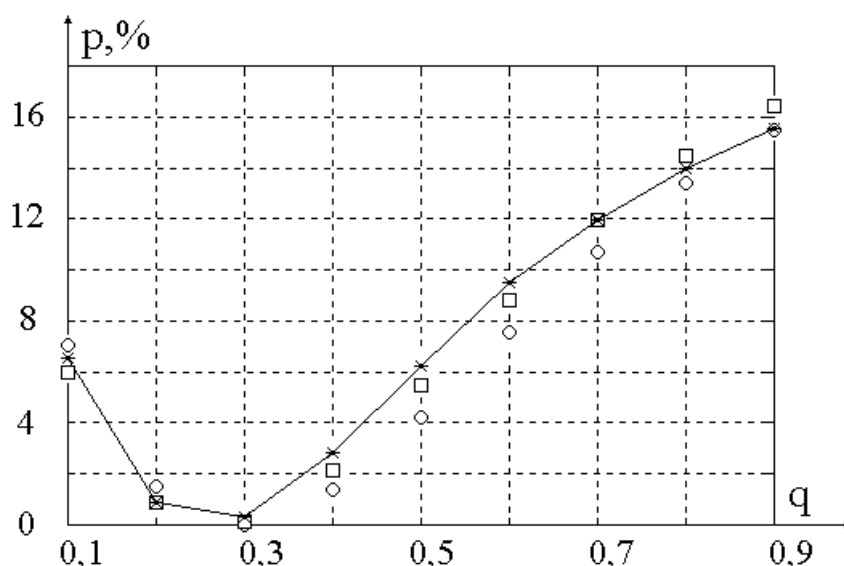


Рис. 4 Зависимость отношения интенсивности отраженной волны к падающей (p) от коэффициента заполнения q для теории эффективных сред нулевого (о), второго (□) порядка и разностного решения (*).

Третьим тестовым примером служила антиотражающая бинарная алмазная решетка с периодом $\lambda/4$ и глубиной профиля $h = \frac{\lambda}{4\sqrt{n}}$, где $n=2,4$, $\lambda=10,6$ мкм.

Отношение ширины ступеньки бинарной решетки к периоду (fill factor, коэффициент заполнения) варьировался от 0,1 до 0,9. Традиционно, для исследования антиотражающих свойств подобных структур применяется теория эффективных сред, известная в двух вариантах, как теория нулевого и первого порядков. На рис. 4 представлены результаты моделирования дифракции света на предложенной решетке. Хорошее соответствие данных позволяет говорить о разностном методе решения уравнений Максвелла, как об инструменте моделирования работы антиотражающих структур.

Разностный метод позволяет исследовать структуру поля в непосредственной окрестности субволновой алмазной решетки, что невозможно при использовании теории эффективных сред.

Представлены результаты моделирования алмазных антиотражающих структур треугольного профиля, сформированных методом абляции поликристаллической пластины.

Рассмотрены технологические погрешности формирования дифракционной светоделительной решетки на торце галогенидного ИК-волновода. Выделены два типа погрешностей: локальные, присущие каждому периоду решетки, и глобальная погрешность, характеризующая профиль в целом.

К “локальным” отнесены ошибки формирования, заметные при исследовании одного периода решетки (рис. 5): в получении заданной высоты микрорельефа (недотрав или перетрав) и наличие клинов травления по обе стороны ступеньки формируемой бинарной решетки.

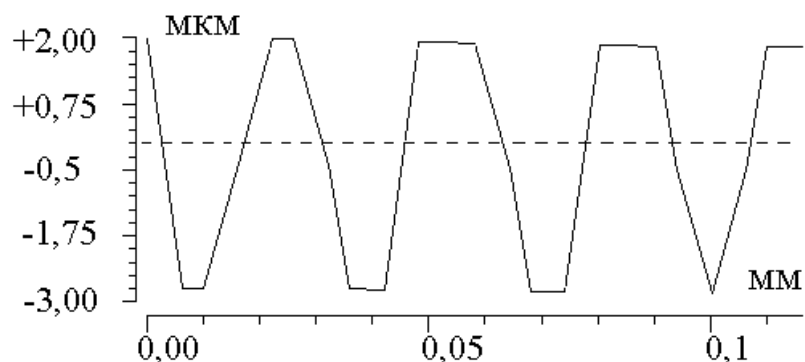


Рис. 5 Профилограмма участка решетки, полученная с помощью интерферометра “Zygo Newview 5000”. Ось абсцисс направлена поперек штрихов решетки, по оси ординат откладывается высота профиля. Пунктирная линия соответствует нулевой отметке высоты микрорельефа.

Отклонения высоты профиля решетки от расчетной связываются с ошибками в определении длительности травления матрицы, с которой штамповался микрорельеф. При недостаточном времени травления высота оказывалась ниже расчетной (недотрав), при избыточном – выше (перетрав). Если расчетная высота h профиля составляет 4,6 мкм, то высота формируемого рельефа варьируется от 4,0 до 5,2 мкм.

Образование клина травления при производстве матрицы объясняется изотропией химических процессов и аморфностью подложки. Острый угол между плоскостью торца и подъемом клина (характеризующий клин травления) для представленной технологии варьировался в интервале $36-44^{\circ}$.

Глобальной технологической погрешностью, выявленной при изучении профилограммы всей решетки (рис. 6) является прогиб профиля.

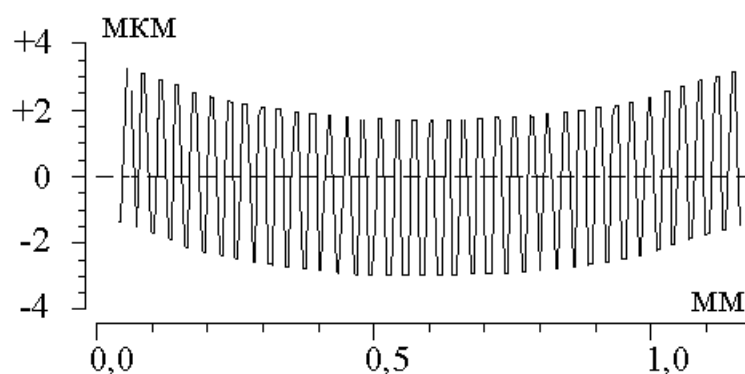


Рис. 6 Профилограмма решетки, полученная с помощью интерферометра “Zygo Newview 5000”. Ось абсцисс направлена поперек штрихов решетки, по оси ординат откладывается высота профиля.

Прогиб профиля решетки объясняется различием в структуре материалов сердечника и оболочки волновода и деформацией матрицы при штамповке. Величина прогиба в экспериментах сильно зависела от температурного режима штамповки и оказываемого на торец давления, варьируясь от 0,3 до 2 мкм в центре волновода.

Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние каждой технологической погрешности в отдельности и всех вместе на формирование дифракционных порядков прошедшей через решетку волны.

При изучении влияния недотрава и перетрава ступеньки бинарной решетки, рассматривались результаты моделирования, представленные в Табл 5.

Таблица 5 Распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам в зависимости от высоты профиля прямоугольной решетки.

Высота профиля h , мкм	интенсивности дифракционных порядков		
	I_0	$I_1=I_{-1}$	$I_2=I_{-2}$
4,0	0,0716	0,3244	0,0111
4,2	0,046	0,3349	0,0126
4,4	0,0275	0,3417	0,0143
4,6	0,0163	0,345	0,0163
4,8	0,0125	0,3448	0,0184
5,0	0,016	0,341	0,0208
5,2	0,0267	0,3339	0,0234

Для решетки, лишенной указанных недостатков ($h_0=4,6$), в первый и минус первый прошедшие порядки направляется суммарно 69% энергии падающего пучка, в нулевой, второй и минус второй порядки – по 1,63%. Отмечаются хорошие светоделительные показатели идеально изготовленной решетки. Исследуя случаи недотрава ($h < h_0$) и перетрава ($h > h_0$), делается вывод о меньших (по сравнению с недотравом) потерях, вызванных перетравом, характеризующимся не только меньшей суммарной энергией первого и минус первого порядков (65% для $h=4,0$ по сравнению с 67% для $h=5,2$), но и существенно большим количеством энергии, направляющейся в нулевой порядок (7,16% по сравнению с 2,67%). Таким образом, хотя суммарная энергия рабочих порядков (первого и минус первого) снижается незначительно (на 4% от общей энергии падающей волны), при максимальном недотраве становится заметным влияние нулевого порядка (возрастает с 1,63% до 7,16%).

К рассмотренной технологической погрешности добавляется клин травления с характеризующим его углом, равным 40° . Результаты моделирования, представленные в Табл. 6, свидетельствуют о существенном влиянии клина травления на распределение интенсивностей.

Так, в случае точно выдержанной высоты профиля ($h_0=4,6$) добавление клина уводит из рабочих порядков четверть энергии падающей волны, а в нулевом порядке появляются лишние десять процентов такой энергии. Максимальный недотрав не ухудшает распределение энергии по первому и минус первому порядкам, но доводит долю энергии в нулевом порядке до 17,28%, что уже не позволяет говорить о такой решетке как о светоделительной. При предельном перетраве доля энергии, ушедшей в нулевой порядок, не увеличивается, однако, сокращается до 37% суммарная энергия рабочих порядков (при h_0 она составля-

ла 45%), что опять не позволяет считать светоделительное свойство решетки удовлетворительным.

Таблица 6 Распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам в зависимости от высоты профиля прямоугольной решетки с клином травления.

высота профи- ля h , мкм	интенсивности дифракционных поряд- ков		
	I_0	$I_1=I_{-1}$	$I_2=I_{-2}$
4,0	0,1728	0,2324	0,02796
4,2	0,1453	0,236	0,02827
4,4	0,13	0,2317	0,02896
4,6	0,1196	0,2241	0,02874
4,8	0,1141	0,2134	0,02778
5,0	0,1142	0,2	0,02601
5,2	0,1177	0,1858	0,02433

Таким образом, при необходимости сократить энергетические потери в первом и минус первом дифракционных порядках от клина травления, предпочтительнее допустить недотрав матрицы. Перетрав же характеризуется меньшими потерями в нулевом порядке.

Основываясь на результатах численного моделирования работы решетки, изготовленной с идеальной матрицы (Табл. 7), делается заключение о небольшом влиянии прогиба профиля на распределение интенсивностей прошедших порядков.

Таблица 7 Распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам в зависимости от глубины прогиба профиля решетки, изготовленной с идеальной матрицы.

глуби- на проги- ба G	интенсивности дифракционных поряд- ков		
	I_0	$I_1=I_{-1}$	$I_2=I_{-2}$
0,2	0,0142	0,3487	0,0164
0,4	0,0142	0,347	0,0163
0,6	0,0141	0,3435	0,0162
0,8	0,014	0,34	0,016
1,0	0,0138	0,3328	0,0156
1,2	0,0136	0,326	0,0152
1,4	0,0134	0,3183	0,0147
1,6	0,0131	0,3082	0,0142
1,8	0,0127	0,2993	0,0136

2,0	0,0123	0,2859	0,0128
-----	--------	--------	--------

Даже в случае предельной величины прогиба ($g=2,0$) суммарные энергетические потери в первом и минус первом порядках составили всего 12%, что вдвое меньше потерь от появления клина травления при точно выдержанной высоте профиля и отсутствии прогиба. Решетка продолжает демонстрировать хорошие светоделительные характеристики: интенсивности нулевого, второго и минус второго порядков не меняются (Табл. 7) при выбранных значениях g .

Добавление клина травления и варьирование высоты профиля при максимальном прогибе (Табл. 8) существенно сказываются на распределении энергии по порядкам по сравнению с предыдущей серией экспериментов (Табл. 7).

Таблица 8 Распределение энергии прошедшей волны по дифракционным порядкам в зависимости от высоты профиля прямоугольной решетки с клином травления и предельной глубиной прогиба.

высота профи- ля H	интенсивности дифракционных порядков		
	I_0	$I_1=I_{-1}$	$I_2=I_{-2}$
4,0	0,1295	0,1921	0,0211
4,2	0,1116	0,1912	0,0206
4,4	0,1025	0,1844	0,0204
4,6	0,0974	0,175	0,0197
4,8	0,0969	0,1631	0,0186
5,0	0,0996	0,1506	0,0176
5,2	0,1048	0,1384	0,0169

Однако, оценивая влияние именно прогиба и сравнивая с результатами аналогичной серии вычислительных экспериментов с решеткой без прогиба (Табл. 6), видим, что из рабочих порядков потеряно дополнительно не более десяти процентов энергии (независимо от высоты профиля). При этом поведение значений интенсивностей нулевого порядка (Табл. 8) по сравнению с результатами из Табл. 6 не ухудшилось.

Решетка, сочетающая глобальную и локальные погрешности изготовления, обладает низкими светоделительными характеристиками. Особенно это относится к случаю предельного перетрава, когда прошедшая энергия почти равномерно распределяется между нулевым, первым и минус первым порядками (10,48%, 13,84% и 13,84%). Более того, от такого профиля внутрь волновода отражается 58,46% падающей энергии.

Решающий вклад в искажение распределения интенсивностей вносит клин травления. Дальнейшие усилия по совершенствованию технологического процесса необходимо сосредоточить на недопущении появления указанного клина, или, по крайней мере, увеличении значения угла, характеризующего клин, что, возможно, например, при использовании технологии плазмохимического травления для изготовления матрицы.

В третьей Главе методом вычислительного эксперимента проведены исследования влияния квантования фазовой функции ДОО на фокусировку излучения линзами с апертурой в несколько длин волн. Также оценивалось влияние технологических погрешностей формирования микрорельефа на работу алмазных дифракционных структур.

Основной материал главы предваряют результаты верификации разностного решения уравнений Максвелла для случая распространения электромагнитного излучения через оптические элементы с ограниченной апертурой.

Задача дифракции Н-волны на бесконечном диэлектрическом цилиндре круглого сечения имеет аналитическое решение в виде разложения в ряд по цилиндрическим функциям: Бесселя внутри и Ханкеля вне цилиндра. Радиус тестового цилиндра задавался равным $r=\lambda/2$ ($\lambda=1$ мкм), показатель преломления материала выбирался как $n=1,5$. Отличие разностного решения от аналитического искалось на отрезке длиной 2λ (с серединой в центре кругового сечения цилиндра и расположенном параллельно направлению падения плоской однородной электромагнитной волны) и характеризовалось (Табл. 9) равномерной погрешностью разностного решения

$$\varepsilon = \max_{j,k} \left| \frac{B_{j,k} - A_{j,k}}{B_{j,k}} \right| \text{ и величиной} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{j,k} (B_{j,k} - A_{j,k})^2}{\sum_{j,k} (B_{j,k})^2}}, \quad (2)$$

выражающей усредненное отклонение от аналитического решения. В выражениях (1),(2) функция $B_{j,k}$ – комплексная амплитуда электрического поля при аналитическом решении задачи дифракции на цилиндре, $A_{j,k}$ – при численном. Индексы соответствуют узлам сеточной области, расположенным на заданном отрезке.

Представленные в Табл. 9 результаты подтверждают допустимость применения развиваемого метода к решению задачи дифракции на ограниченных структурах. Продемонстрирована сходимость метода и предпочтительность предложенного в первой Главе способа задания падающей волны над традиционным.

Таблица 9 Зависимости погрешностей вычислительных экспериментов при исследовании дифракции на диэлектрическом цилиндре круглого сечения от дискретизации сеточной области (Q, Q_t) для “прозрачного” источника (колонки А) и аналитического задания падающей волны в методе TF/SF (колонки В).

(Q,Q _t)	А		В	
	ε, %	δ, %	ε, %	δ, %
(10,20)	16,0924	6,7265	19,056	7,0968
(20,40)	6,2121	1,3273	6,903	1,5286

(50,100)	2,1102	0,5124	2,7825	0,5593
(100,200)	0,8674	0,2598	1,4456	0,4243

Приведены результаты моделирования прохождения плоской однородной волны через две цилиндрические рефракционные микролинзы с апертурами 8λ и 16λ , радиусами кривизны 5λ и 10λ и показателем преломления $n=2$ при $\lambda=1$ мкм (рис. 7а для второй микролинзы). Выделением на соответствующих рефракционных микролинзах зон Френеля и квантованием непрерывных рельефов рассчитаны бинарные и четырехуровневые дифракционные линзы, проведено моделирование распространения света через такие структуры (рис. 7б,в).

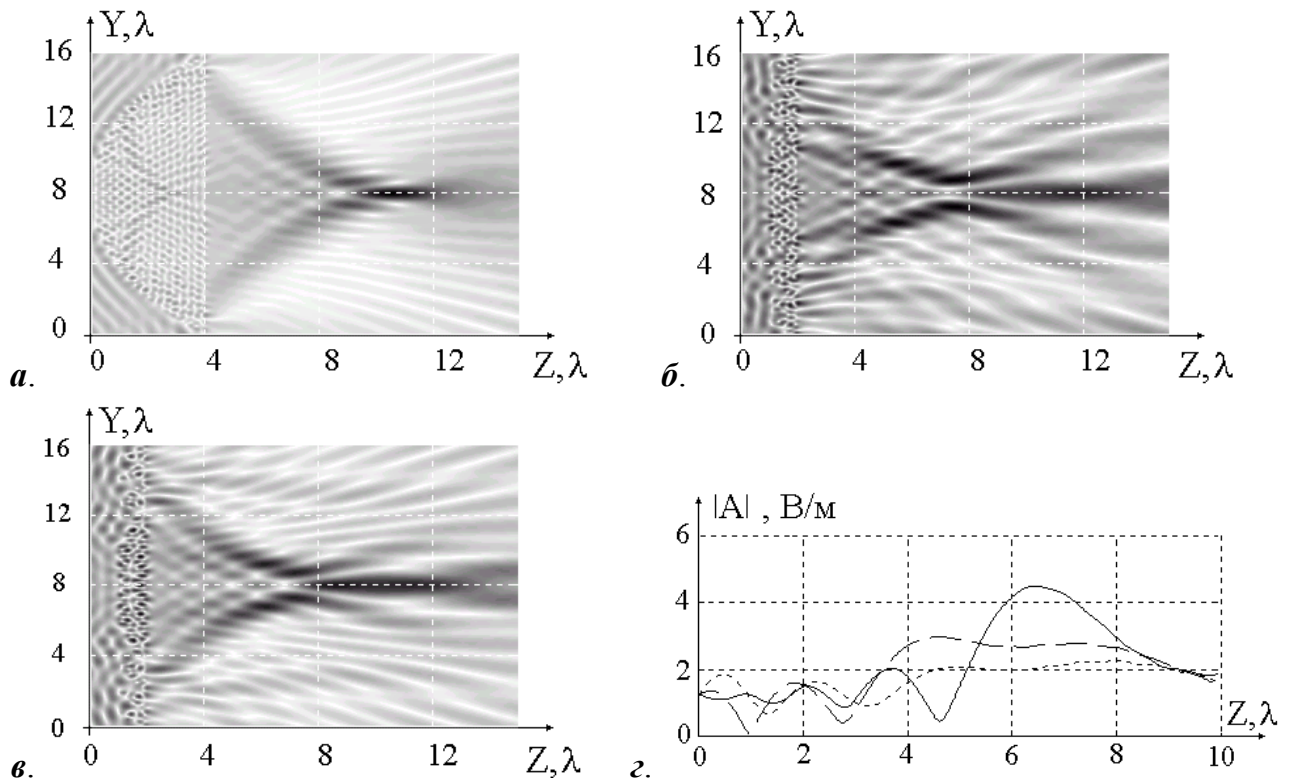


Рис. 7 Распределения модуля комплексной амплитуды ($|A|$) электрического поля в рефракционной микролинзе (случай а, непрерывная кривая на рис. 7г), соответствующих ей бинарной (случай б, пунктирная кривая на рис. 7г) и четырехуровневой (случай в, штриховая кривая на рис. 7г) дифракционной микролинзах, на главной оптической оси представленных микролинз (случай 7г).

Заметно увеличение значения максимума модулей комплексных амплитуд напряженностей электрических полей на главной оптической оси за дифракционными линзами (рис. 7г) с ростом числа уровней квантования ДОО, что согласуется с натурными наблюдениями.

Выявлены отличия положений максимумов модулей комплексных амплитуд от рассчитанных в рамках геометрической оптики, согласно которой фокусировка должна произойти на расстоянии 8λ от правого полюса микролинз (рис. 7г).

В результате сравнения распределения модуля комплексной амплитуды на главных оптических осях рефракционных микролинз с апертурами 8λ и 16λ вы-

явлен рост изучаемой величины с увеличением апертуры. Неудивительно, что микролинза, освещаемая большим участком фронта плоской однородной волны, собирает больше энергии. Однако, для разноапертурных дифракционных микролинз подобный эффект не наблюдается. Максимумы модулей комплексных амплитуд на главных оптических осях не увеличиваются с ростом апертуры как для четырехуровневых, так и для бинарных микролинз. Между тем, из анализа дифракционной картины за линзами с апертурой 16λ (рис. 7б,в) можно сделать вывод, что значительного рассеивания энергии не происходит, она концентрируется на главной оптической оси, как и в случае линз меньшей апертуры. С ростом апертуры дифракционных линз происходит удлинение зоны фокусировки по направлению Z, в этом случае вместо ярко выраженного максимума наблюдается фокусировка в продольные отрезки (рис. 7г).

При изготовлении дифракционного микрорельефа для фокусировки излучения мощных CO_2 лазеров ($\lambda=10,6$ мкм) используется прямое лазерное травление поверхности алмазной пленки ($n=2,4$) путем селективной абляции с помощью эксимерного УФ-лазера. Данный метод не позволяет формировать расчетный ступенчатый профиль в силу особенностей технологии, что влечет за собой отклонения в работе ДОЭ от ожидаемых характеристик.

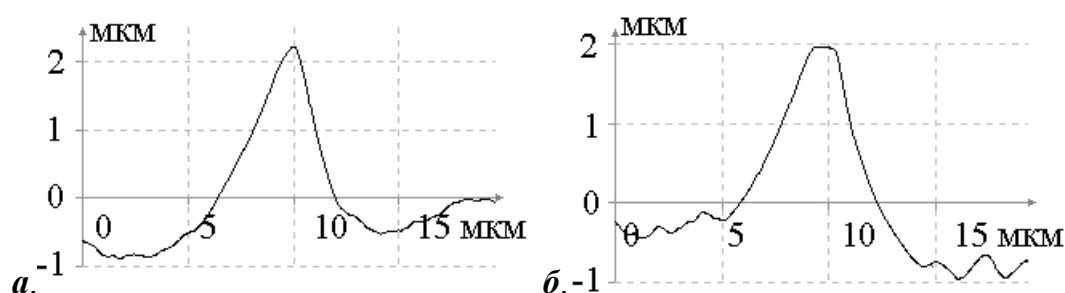


Рис. 8 Вид локального искажения микрорельефа на стыке двух элементарных областей структурирования: а) с одинаковыми глубинами травления; б) с разными глубинами травления.

Систематические локальные искажения микрорельефа ("бортики") возникают на границах элементарных областей структурирования - областей, каждая из которых соответствует одному отсчету фазовой функции ДОЭ (рис. 8).

Влияние субволновой погрешности изготовления характеризуется величиной $\delta=(I-I_0)/I$, которая показывает долю энергии, ушедшей из нулевого порядка при прохождении рельефа с "бортиком" (I_0 - интенсивность нулевого прошедшего порядка при наличии "бортиков", I – без таковых).

Таблица 10 Оценка влияния технологических погрешностей ($\delta, \%$), возникающих в виде "бортиков" (строки А,С) и "канавок" (строки В,Д) на одном уровне квантования, с линейными размерами элементарной области травления 40 (строки А,В) и 60 (строки С,Д) мкм.

	уровни квантования фазовой функции						
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
A	3,39	9,54	15,21	31,12	38,64	50,45	55,37
B	2,59	8,37	10,43	22,22	28,57	40,69	42,05
C	2,55	6,93	10,94	22,1	27,75	36,35	39,78

D	1,97	5,98	7,54	15,65	19,96	28,9	29,66
---	------	------	------	-------	-------	------	-------

Показано, что для линейного участка фазовой функции ДОЭ, наличие технологических погрешностей, начиная с III уровня квантования, заметно влияет ($\delta > 5\%$) на работу этого участка (Табл. 10, строка А).

Технология травления позволяет заменить погрешности в виде выступов над рельефом на углубления (“канавки”) в нем, при этом сохраняя треугольную форму погрешностей. Сравнивая результаты, представленные в строках А и В Табл. 10 можно сделать вывод о некотором ослаблении влияния технологических погрешностей на работу фрагментов II и III уровней ДОЭ и существенном улучшении работы (уменьшении величины δ в 1,46, 1,4, 1,35, 1,24 и 1,32 раза) фрагментов ниже расположенных уровней. В силу этого, технология травления, оставляющая погрешности в виде углублений, полагается предпочтительнее существующей технологии.

Другой подход к ослаблению влияния технологических погрешностей связан с увеличением линейного размера элементарной области травления. При изменении указанной величины от 40 мкм (Табл. 10, строки А,В) до 60 мкм (Табл. 10, строки С,Д) технологические погрешности влияют на работу участков ДОЭ в среднем на 30% меньше. Однако увеличение размера элементарной области травления ведет к снижению точности аппроксимации расчетной непрерывной фазовой функции линзы ее дискретным аналогом.

В четвертой Главе представлены метод декомпозиции сеточной области и параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений неявных разностных схем, позволяющие сократить длительность моделирования распространения электромагнитной волны.

Возможность проведения декомпозиции обосновывается на примере области с двумя оптическими элементами (*A* и *B*), расположенными один за другим (*B* за *A*) по направлению распространения падающей волны. Развиваясь во времени, процесс распространения падающей волны доходит сначала до элемента *A*, достигая затем *B*. На определенном этапе этого процесса волна, отраженная от *B*, следует обратно к *A* и дифрагирует на нем. Часть этой волны переотражается к *B*, но в течение рассматриваемого временного промежутка еще не достигает его. Одновременно продолжается дифракция на *B*, до которого еще не дошла переотраженная от *A* волна. Отмечается, что на данном этапе искомая комплексная амплитуда поля за *B* не меняется. Следовательно, расчет поля, дифрагирующего на *B*, от момента появления отраженной от *B* волны до ее переотражения от *A* обратно к *B*, излишен. Избежать его позволяет декомпозиция области.

Основой метода декомпозиции в диссертации признается учет локально-устоявшегося поля (в таких подобластях вычисления не производятся) и принцип суперпозиции, позволяющий согласовывать решения на границах подобластей.

При исследовании ДОЭ с двумя нанесенными рельефами уместно выделять в отдельные подобласти каждую дифракционную структуру, моделируя распространение света в однородном пространстве между ними разложением на плоские волны. В случае слоистого дифракционного элемента разбиение на подобласти производится по слоям.

Вычисления при декомпозиции на две подобласти описываются следующим образом. На первом шаге алгоритма (рис. 9а) производится ввод излучения в первую подобласть; при этом источник располагается у левого края, регистрация прошедшего излучения производится у правого. Второй шаг характеризуется работой со второй подобластью (рис. 49б), у левого края которой излучается волна, зарегистрированная на предыдущем шаге. Регистрация производится не только у правого края подобласти (прошедшее излучение), но и с левого края (отраженная волна) – в том же узле подобласти, в котором задается падающее поле.

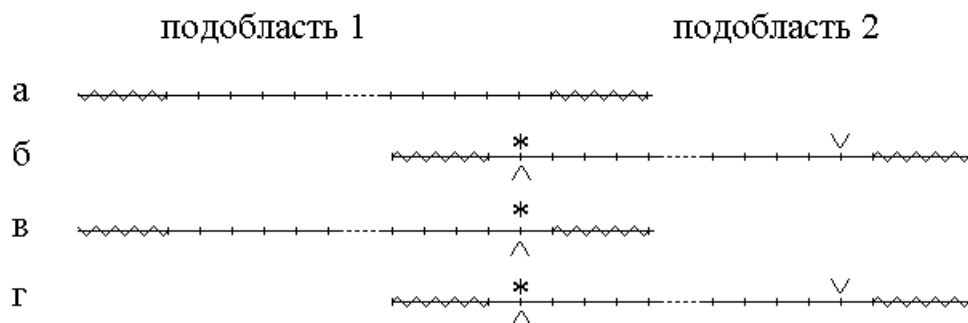


Рис. 9 Вычисления по алгоритму при декомпозиции на две подобласти в случае неоднородной среды; а,б,в,г – 1-ый, 2-ой, 3-ий и 4-ый шаги алгоритма соответственно. Звездочкой обозначен узел задания падающей волны, “нижней” галочкой узел, в котором производится регистрация отраженного излучения, “верхней” – прошедшего, у границ вычислительных областей расположены поглощающие слои (пилообразная кривая).

Следующие два шага (рис. 9в,г) выполняются в цикле Г раз и предназначены для учета влияния переотраженных (G раз) волн на поле, формирующееся у правого края второй подобласти – на выходе из оптического элемента (искоемое поле). Возвращение в первую подобласть волны, отраженной обратно из второй подобласти, производится на третьем шаге алгоритма (рис. 9в), когда с правого края первой подобласти вводится волна, зарегистрированная у левого края второй подобласти на предыдущем шаге. Регистрации на третьем шаге подлежит отраженная в первой подобласти волна (у правого края), влияющая на искомое поле, а прошедшая через подобласть волна покинет область эксперимента в направлении $-Z$ и не регистрируется. На четвертом шаге (рис. 9г) к ранее прошедшей через оптическую систему волне добавляется новая, переотраженная до этого из второй подобласти (шаг 2) в первую (шаг 3) и прошедшая на текущем шаге до правого края второй подобласти. Такое добавление осуществляется сложением соответствующих комплексных амплитуд, согласно принципу суперпозиции. Отраженная же вторично во второй подобласти часть падающей волны вернется в первую подобласть на следующей итерации цикла (шаг 3).

В качестве тестового примера исследовалось прохождение Т-волны ($\lambda=1$ мкм) через плоскопараллельную пластинку. При толщине пластинки в 1 мкм и показателе преломления материала $n=2$ модули комплексных амплитуд напряженностей электрического поля падающей и прошедшей через пластинку волн должны быть равны. Постановка вычислительного эксперимента предполагает разбиение сеточной области на две подобласти: первая характеризуется перехо-

дом вакуум/диэлектрик, вторая – диэлектрик/вакуум. При значении модуля комплексной амплитуды падающей волны в 1 В/м демонстрируется результат моделирования, с высокой точностью соответствующий теоретически ожидаемому (Табл. 11).

Таблица 11. Зависимость значения модуля комплексной амплитуды прошедшего электрического поля ($|A|$) от числа переотражений G в случае декомпозиции на две подобласти при исследовании прохождения Т-волны через плоскопараллельную пластинку.

G	0	1	2
$ A $, В/м	0,888 3	0,985 3	0,995 5

Отмечается, что значение $|A|$, полученное для $G=0$, соответствует величине 0,888, рассчитанной по формулам Френеля без учета переотражений.

Декомпозиция на D подобластей сопровождается ускорением вычислений по алгоритму, определяемым по формуле

$$S = \frac{D^2}{D + 2(D-1)G}. \quad (3)$$

Отдельная задача связывается с выбором числа переотражений. С одной стороны, чем больше это число, тем точнее определяется результирующее поле. Однако, рост G вызывает падение ускорения (3) алгоритма при фиксированном D . Предлагается из физических соображений выбирать G заранее, определяя затем величины D , при которых ускорение теоретически может быть достигнуто. Пренебрегая зависимостью числа переотражений от конфигурации оптического элемента, принимается $G=0$ при исследовании фоторефрактивных кристаллов и бездефектных волноводов (отраженная волна отсутствует), $G=1$ для элементов из оптических стекол и $G=2$ для более плотных оптических сред с $n>2$ (например, алмазные пленки).

Другим способом сокращения длительности моделирования процесса дифракции признается организация параллельных вычислений по неявным разностным схемам, представленным в первой Главе.

Предложено два параллельных алгоритма, основанных на методе встречных прогонок и одномерном (либо циклическом) разбиении сеточной области. При исследовании ДОО с ограниченной апертурой, вытянутых в одном направлении, целесообразным признается одномерное разбиение, характеризующееся в этом случае меньшим объемом пересылаемых по сети данных. Моделирование дифракции на одном периоде неограниченной решетки желательно сопровождать циклическим распределением сеточной области между процессорами вычислительной системы.

На рис. 10 представлен пример распределения сеточной области между восьмью процессорами при циклическом разбиении.

На первом шаге алгоритма производятся вычисления по прямому ходу метода встречных прогонок (рис. 10а) над левой и правой четвертями области. Второй шаг сопровождается пересылкой прогоночных коэффициентов (процессоры 1,2,3,4,5,6,7,8 отправляют данные процессорам 2,1,4,3,6,5,8,7) и продолже-

нием прямого хода для внутренних четвертей. С третьего шага (рис. 10b) начинается обратный ход прогонок, предваряемый пересылкой прогоночных коэффициентов (процессоры 1,2,3,4,5,6,7,8 отправляют данные процессорам 5,6,7,8,1,2,3,4). На заключительном шаге завершается обратный ход метода встречных прогонок для выделенной строки сеточной области. После решения всех разностных уравнений, соответствующих распространению излучения в горизонтальном направлении (по Z, рис. 2), аналогичные действия производятся для вертикального (по Y рис. 2).

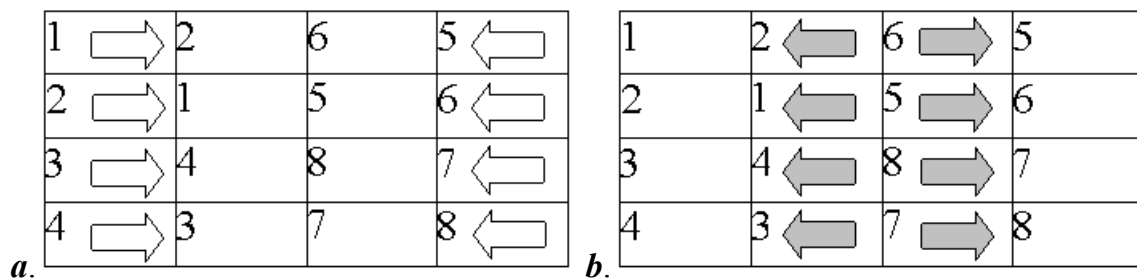


Рис. 10 Этапы алгоритма, соответствующие началу прямого (случай a) и обратного (случай b) ходов метода встречных прогонок, при организации вычислений на восьмипроцессорном кластере.

Представленные результаты вычислительных экспериментов (проводившихся на кластере СНЦ РАН, состоящем из двухпроцессорных ЭМВ Pentium III (600 МГц), связанных сетью Fast Ethernet), подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов (рис. 11 для алгоритма с циклическим разбиением).

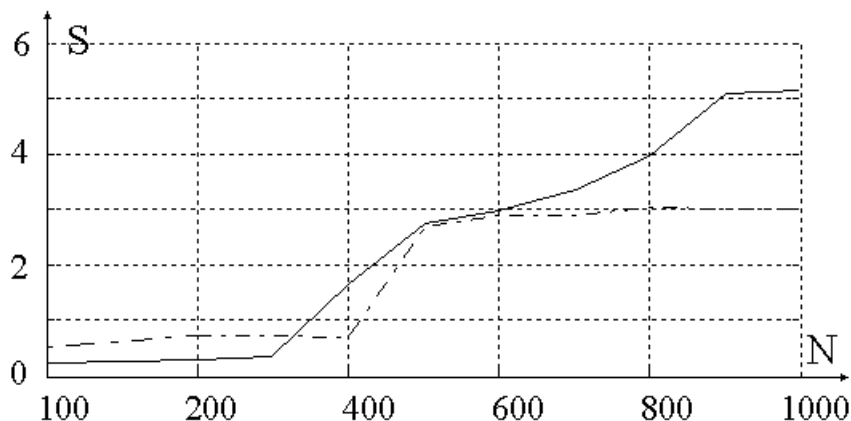


Рис. 11 Зависимости ускорений S параллельных вычислительных процессов от размерности сеточной области N (в диапазоне 100-1000 узлов), непрерывная кривая соответствует восьми процессорам, штрих-пунктирная — четырем.

Предложена блочная модификация обоих алгоритмов, позволяющая повысить (в среднем в 1,5 раза) ускорение вычислений за счет учета пакетной структуры сообщений, пересылаемых по сети.

Показано, что представленные в четвертой Главе параллельные алгоритмы по сравнению с известными алгоритмами декомпозиции ленточной матрицы и циклической редукции характеризуются меньшим количеством арифметических операций (в случае одномерного разбиения в 2,3 и 1,5 раза, циклического — в 3,6 и 2 раза). В отличие от метода, основанного на правой прогонке, вычисления по

предложенным алгоритмам сопровождаются менее длительными простоями процессоров (в 2 раза для одномерного разбиения), либо коммуникациями меньшей длительности (в 2 раза для циклического разбиения).

Методы и алгоритмы, представленные в четвертой Главе, позволяют сократить длительность моделирования процесса дифракции, компенсируя главный недостаток разностного метода решения уравнений Максвелла – высокую вычислительную сложность.

В Приложение вынесены варианты неявных разностных схем для различных сеточных областей и краевых условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена задача дифракции лазерного излучения на оптическом микрорельефе с использованием разностных схем для уравнений Максвелла, декомпозиции сеточной области и параллельных вычислений; на этой основе исследованы алмазные поликристаллические ДОО и дифракционные решетки на торце волновода.

Основными результатами работы являются следующие:

1. Разработан комплекс методов и алгоритмов, позволяющих проводить вычислительные эксперименты для исследования широкого класса элементов микрооптики.

2. Исследованы технологические погрешности формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода и их влияние на светоделительные свойства решетки. Показано, что решающее значение на искажение дифракционной картины оказывает клин травления, уводя из рабочих порядков до четверти энергии падающей волны. Прогиб профиля решетки до величины 1,4 мкм при радиусе сердечника волокна в 420 мкм оказывает меньшее влияние на дифракционную картину (из рабочих порядков уходит до 6% энергии падающей волны), так же как и перетрав (недотрав) профиля решетки, равный 10% глубины канавки (из рабочих порядков уходит до 4% энергии падающей волны).

3. Исследовано влияние технологических погрешностей изготовления на работу алмазных дифракционных микроструктур. Показано, что погрешности в виде впадин на микрорельефе алмазных ДОО связаны с меньшими (в среднем на 25%) энергетическими потерями, чем погрешности в виде выступов. Увеличение линейного размера элементарной области травления приводит к относительному снижению дифракционных потерь данного типа (в среднем на 30% при полукторном увеличении линейного размера).

4. Для расчета дифракции на ДОО посредством разностного решения уравнений Максвелла разработан метод декомпозиции сеточной области. Метод позволяет сочетать разностное решение на микрорельефе ДОО и разложение по плоским волнам в подложке, что сокращает длительность моделирования (ускорение вычислений пропорционально отношению толщины ДОО к высоте рельефа).

5. Разработаны параллельные алгоритмы для реализации вычислений по неявным разностным схемам. Представленные параллельные алгоритмы отли-

чаются от известных аналогов применением метода встречных прогонок и циклической декомпозицией сеточной области. При этом они характеризуются большей эффективностью: по сравнению с методами декомпозиции ленточной матрицы и циклической редукции от 3,6 до 1,5 раз снижено количество арифметических операций, в отличие от алгоритмов, основанными на правой прогонке, длительность простоев и объем пересылаемых данных сокращены в 2 раза.

Содержание диссертации отражено в следующих основных публикациях:

Монографии:

1. *Методы Компьютерной* (Издание второе, исправленное)/ раздел 3.8 «Моделирование распространения электромагнитного излучения методом конечных разностей», с. 224-232. – Д.Л. Головашкин; раздел 3.9 «Анализ прохождения электромагнитного импульса через антиотражающую структуру», с. 232-236., раздел 4.6 «Формирование дифракционного рельефа с помощью лазерного микроструктурирования алмазных пленок», с. 282-288, – Д.Л. Головашкин, В.С. Павельев// М.: «Физматлит», 2003, 688 с.
2. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*/ paragraph 3.8 «Modeling the electromagnetic radiation propagation using a method of finite differences», p. 247-257. – D.L. Golovashkin; paragraph 3.9 «Analysis of electromagnetic impulse traveling through an antireflecting structure», p. 258-263., paragraph 4.6 «Generation of diffractive microrelief by laser-aided structuring of diamond films», p. 310-323. – D.L. Golovashkin, V.S. Pavelyev// John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 2002, 766 p.
3. *Методы компьютерного расчета дифракционных оптических элементов* / раздел 3.8 «Моделирование распространения электромагнитного излучения методом конечных разностей», с. 192-201. – Д.Л. Головашкин; раздел 3.9 «Анализ прохождения электромагнитного импульса через антиотражающую структуру», с. 201-204., раздел 4.6 «Формирование дифракционного рельефа с помощью лазерного микроструктурирования алмазных пленок», с. 236-244. – Д.Л. Головашкин, В.С. Павельев// Tianjin Science & Technology Press, Tianjin, 2007, 570 p. (на китайском).

Статьи и материалы конференций:

1. Головашкин Д.Л., Дегтярев А.А., Сойфер В.А. Моделирование волноводно-го распространения оптического излучения в рамках электромагнитной теории// Компьютерная оптика, 1997. – № 17.- С.5-9.
2. Головашкин Д.Л., Дегтярев А.А. Алгоритм второго порядка точности по времени для решения уравнений Максвелла// Компьютерная оптика, 1998. – № 18.- С.39-41.
3. Головашкин Д.Л., Павельев В.С., Сойфер В.А. Моделирование прохождения электромагнитной волны через алмазную антиотражающую структуру// Известия СНЦ РАН, 1999.- Том 1, № 1.-С.95-98.
4. Головашкин Д.Л. Разностная схема для уравнений Максвелла// Труды XI межвузовской конференции “Математическое моделирование и краевые задачи”. - Самара, 1999.- С.43-45.
5. Головашкин Д.Л., Павельев В.С., Сойфер В.А. Численный анализ прохождения света через антиотражающую алмазную структуру в рамках электромагнитной теории// Компьютерная оптика, 1999.- № 19.-С.44-46.

6. Головашкин Д.Л., Сойфер В.А. Анализ прохождения электромагнитного излучения через дифракционную линзу// Автометрия, 1999.- Том 35, № 6.- С. 119-121.
7. Pavelyev V., Golovashkin D., Soifer V., Konov V., Kononenko V., Pimenov S., Prokhorov A. CVD diamond transmissive diffractive optics for CO₂ lasers// International conference "Diffractive Optics", Jena 1999.- P. 32-35.
8. Pavelyev V., Duparre M., Luedge B., Soifer V., Kowarschik R., Golovashkin D. Invariant laser beams – fundamental properties and their investigation by computer simulation and optical experiment// Proceedings SPIE, 1999.- Vol. 3737.- P. 509-519.
9. Головашкин Д.Л., Павельев В.С. Анализ прохождения электромагнитного импульса через алмазную антиотражающую структуру// Материалы второй байкальской школы по фундаментальной физике.- Иркутск, 1999, Том 1.- С. 280-286.
10. Головашкин Д.Л., Сойфер В.А. Моделирование распространения электромагнитной волны посредством разностного решения уравнений Максвелла// «Проблемы оптической физики» Материалы международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике.- Саратов, 2000.- С.52-53
11. Головашкин Д.Л., Сойфер В.А., Шустов В.А. Реализация параллельных вычислений при разностном решении уравнений математической физики// Известия СНЦ РАН, 2000.- Том 2, № 1.-С.108-112.
12. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Реализация параллельных вычислений при исследовании дифракционных микролинз с высокой числовой апертурой// Труды всероссийской научной конференции «Высокопроизводительные вычисления и их приложения».- Черноголовка, 2000.- С. 104-106.
13. Golovashkin D.L., Pavelyev V.S., Soifer V.A. Numerical simulation of light transmission by an antireflecting diamond structure using the electromagnetic theory// Optical memory and neural networks, 2000.- Vol.9, № 1.-P.63-68.
14. Pavelyev V., Duparre M., Luedge B., Soifer V., Kowarschik R., Golovashkin D. Invariant laser beams – fundamental properties and their investigation by computer simulation and optical experiment// Optical memory and neural networks, 2000.- Vol.9, № 1.-P.45-66.
15. Головашкин Д.Л., Сойфер В.А. Реализация параллельных вычислений при разностном решении задачи распространения излучения в трехмерном оптическом элементе// Компьютерная оптика, 2000. – № 20.- С.15-17.
16. Golovashkin D.L., Soifer V.A. Modeling the electromagnetic wave propagation by use of difference solution of Maxwell's equations// Saratov Fall Meeting'99 "Laser physics and Spectroscopy".- Saratov, 2000.- P.143-150.
17. Головашкин Д.Л., Дюпарре М., Павельев В.С., Сойфер В.А. Моделирование влияния субволновых погрешностей изготовления алмазной дифракционной линзы на фокусировку лазерного излучения// Труды конференции «Математическое моделирование».- Самара, 2001.- С.122-125.
18. Головашкин Д.Л., Дюпарре М., Павельев В.С., Сойфер В.А. Моделирование прохождения ИК-излучения через алмазную дифракционную линзу с субволновыми технологическими погрешностями микрорельефа// Компьютерная оптика, 2001. – № 21.- С.131-133.

19. Котляр В.В., Нестеренко Д.В., Головашкин Д.Л. Анализ дифракции света на микролинзах в свободном пространстве и в волноводе// Компьютерная оптика, 2001. – № 21.- С.31-36.
20. Головашкин Д.Л., Павельев В.С., Дюпарре М., Кононенко В.В. Анализ распространения излучения через одноуровневые фрагменты ДОО с технологическими погрешностями// Компьютерная оптика, 2001. – № 22.- С.62-64.
21. Головашкин Д.Л. Анализ распространения излучения через фрагменты ДОО с технологическими погрешностями микрорельефа// Известия СНЦ РАН, 2002.- Том 4, № 1.-С.68-72.
22. Golovashkin D.L., Pavelyev V.S., Duparre M., Kononenko V.V. Analysis of light propagation through one-level DOE-fragments with fabrication errors// Optical memory and neural networks, 2002.- Vol.11, № 2.-P.131-134.
23. Головашкин Д.Л. Применение метода встречных прогонок для синтеза параллельного алгоритма решения сеточных уравнений трехдиагонального вида// Компьютерная оптика, 2002. – № 24.- С.33-39.
24. Павельев В.С., Головашкин Д.Л., Кононенко В.В., Пименов С.М. Выбор параметров микрорельефа алмазного ДОО на основе численного анализа локальных технологических погрешностей// Компьютерная оптика, 2002. – № 24.- С.81-83.
25. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л., Сафина В.Н. Применение метода конечных разностей для решения задачи дифракции Н-волны на двумерных диэлектрических решетках// Компьютерная оптика, 2003. – № 25.- С.36-40.
26. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Golovashkin D.L., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Duparre M., Luedge B. Diamond DOE's for focusing of IR laser beams into pregiven focal domains// Optical memory and neural networks, 2003.- Vol.12, № 4.-P.305-315.
27. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Golovashkin D.L., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Duparre M., Luedge B. Diamond Diffractive Optical Elements for Infrared Laser Beam Control// Proceedings SPIE, 2004.- Vol. 5182.-P. 222-232.
28. Головашкин Д.Л., Ярмушкин С.В. Сравнение параллельных алгоритмов решения трехдиагональных СЛАУ// Вестник СамГТУ, 2004.- № 26.-С.78-82.
29. Головашкин Д.Л. Горбунов О.Е. Параллельные алгоритмы решения СЛАУ методом Зайделя// Вестник СамГТУ, 2004.- № 27.-С.10-13.
30. Golovashkin D.L., Kazansky N.L., Safina V.N. Use of the finite-difference method for solving the problem of H-wave diffraction by two-dimensional dielectric gratings// Optical memory and neural networks, 2004.- Vol.13, № 1.- P.55-62.
31. Головашкин Д.Л. Дифракция Н-волны на двумерной диэлектрической решетке// Математическое моделирование, 2004. – Том 16, № 9.- С.83-91.
32. Pavelyev V.S., Soifer V.A., Golovashkin D.L., Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M. Diamond Diffractive Optical Elements for Infrared Laser Beam Control// Proceedings SPIE, 2004.- Vol. 5456.-P. 209-219.
33. Головашкин Д.Л. Параллельные алгоритмы метода встречных прогонок// Материалы четвертого международного научно-практического семинара и Всероссийской молодежной школы «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». - Самара, 2004.- С.59-66.
34. Головашкин Д.Л. Дифракция Н-волны на двумерной идеально проводящей решетке// Математическое моделирование, 2005. – Том 17, № 4.- С.53-61.

35. Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю., Павельев В.С., Якуненкова Д.М., Рунков Ю.А., Головашкин Д.Л. Формирование и исследование дифракционного микрорельефа на торце галогенидного ИК волновода// Компьютерная оптика, 2005. – № 27.- С.45-49.
36. Головашкин Д.Л., Филатов М.В. Параллельные алгоритмы метода циклической прогонки// Компьютерная оптика, 2005. – № 27.- С.123-130.
37. Головашкин Д.Л. Параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений трехдиагонального вида, основанные на методе встречных прогонок// Сборник трудов II Международной научной конференции “Сетевые компьютерные технологии”.- Минск, 2005.- С.75-80
38. Головашкин Д.Л. Параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений трехдиагонального вида, основанные на методе встречных прогонок// Математическое моделирование, 2005. – Том 17, № 11.- С.118-128.
39. Golovashkin D.L. Simulation of light propagation through a DOE using the FDTD method// Proceedings SPIE, 2006.- Vol. 6187.-P. 61870G-1-61870G-11.
40. Golovashkin D.L. Simulation of light propagation through a grids and lenses using the FDTD method// Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics’ 2006.- St.Peterburg, 2006.- P.457-459.
41. Gavrilov A.V., Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Golovashkin D.L. Numerical investigation of mode content depending on step-like fiber’s micro-bending with use of beam propagation method// Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics’ 2006.- St.Peterburg, 2006.- P.167-169.
42. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла// Автометрия, 2006.- Том 42, № 6.-С. 78-85.
43. А.В. Волков, В.А. Головашкин Д.Л., Ерополов, Н.Л. Казанский, С.В. Карпеев, О.Ю. Моисеев, В.С. Павельев, В.Г. Артюшенко, В.В. Кашин Исследование погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода// Известия СНЦ РАН, 2006.- Том 8, № 4.-С.1211-1217.
44. Головашкин Д.Л., Казанский Н.Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла// Математическое моделирование, 2007. – Том 19, № 2.- С.48-58.
45. Головашкин Д.Л. Постановка излучающего условия при моделировании работы цилиндрических дифракционных оптических элементов методом разностного решения уравнений Максвелла// Математическое моделирование, 2007. – Том 19, № 3.- С.3-14.
46. Golovashkin D.L. Finite-difference methods for solving Maxwell’s equations, invited paper// Proceedings of the International Sino-Russia Seminar on Diffractive Optics, Edited by Optoelectronic Topical Committee of China Aerospace Society.- Xi'an (China).- 2007.- P.181-186.
47. Головашкин Д.Л., Логанова Л.В. Векторный алгоритм метода встречных прогонок для потока задач// Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием “Математическое моделирование и краевые задачи”.- Самара, 2007.- С. 25-28.

Подписано к печати _____

Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная

Усл. печ. л. 2,0

