

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 535.391.4.015.1; 535.394; 535.42; 538.975

СЕРДЮК

Владимир Михайлович

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИФРАКЦИИ
НА ОТВЕРСТИЯХ В ПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНАХ
И В ПЛОСКОСЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности

01.04.02 – теоретическая физика

Минск, 2026

Научная работа выполнена в Научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета.

Научный консультант: **Кучинский Петр Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
директор Научно-исследовательского учреждения
«Институт прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко» Белорусского
государственного университета

Официальные оппоненты: **Семченко Игорь Валентинович**,
член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель генерального директора по научной
деятельности ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и
лазерная техника» НАН Беларуси;

Сердюков Анатолий Николаевич,
член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры оптики факультета физики и
информационных технологий Гомельского
государственного университета имени Франциска
Скорины;

Афоненко Александр Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой квантовой радиофизики и
оптоэлектроники факультета радиофизики и
компьютерных технологий Белорусского
государственного университета.

Оппонирующая
организация: Учреждение образования «Белорусский
государственный университет информатики
и радиоэлектроники».

Защита состоится « 4 » ноября 2026 г. в 14:30 часов на заседании совета
по защите диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени
Б. И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»
по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2;
тел. +375 (17) 270-80-59, e-mail: nadyas2009@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН
Беларуси.

Автореферат разослан « 1 » октября 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физико-математических наук

 Н.Д. Шайковская

ВВЕДЕНИЕ

Явление дифракции характеризует отклонения от законов геометрической оптики в процессах передачи и преобразования электромагнитного излучения различными оптическими и радиофизическими устройствами и системами. Для его описания применяется математическая теория дифракции, которая использует строгие методы решения дифракционных задач и упрощенные приближенные методы. Строгие решения строятся на основе полных систем функций, составленных из частных точных решений уравнений Максвелла в различных областях распространения поля, и удовлетворяют условиям сшивания (согласования) этих систем на границах областей. Поэтому они дают полное описание пространственной структуры поля во всей области его распространения при любых значениях физических параметров задачи (длины волны излучения, размеров дифракционного объекта, показателей преломления и поглощения диэлектриков). Если достоверность приближенных решений обычно нужно доказывать путем сравнения с другими решениями или с результатами эксперимента, то для проверки достоверности строгого решения достаточно провести оценку точности выполнения граничных условий.

При современной тенденции развития технологий ко все большей миниатюризации значение строгих решений для теории и практики со временем будет возрастать, поскольку с уменьшением размеров оптических и электронных устройств существенное значение приобретает ближняя зона дифракции на расстояниях порядка длины волны излучения, где приближенные решения обычно не применимы. К числу строгих решений теории относятся, например, решение Зоммерфельда для дифракции плоской электромагнитной волны на проводящей полуплоскости, решение Ми задачи дифракции на шаре, решение Вайнштейна для дифракции волноводной моды на открытом конце проводящего волновода. Однако число дифракционных задач, для которых известны строгие решения, невелико и явно недостаточно для современных научных и технических потребностей. Среди них нет решений, описывающих прохождение электромагнитных полей через отверстия в непрозрачных экранах, поэтому поиск и обобщение новых строгих моделей является актуальной задачей теории. В настоящей работе ставится задача получения строгих решений для описания пространственной структуры полей дифракции на макро- и микроотверстиях прямоугольной и круговой геометрии в плоских идеально проводящих экранах. Такие решения необходимы для моделирования процессов прохождения электромагнитного излучения через поперечно ограниченные системы, например, в оптической литографии и оптике малоразмерных систем. При этом формулы, которые приводятся во многих учебниках и монографиях для поля дифракции на макроразмерных отверстиях,

исходят из приближения Френеля-Кирхгофа, которое не учитывает рассеяние падающего поля на краях отверстия, и потому эти формулы справедливы только на больших расстояниях от краев в сравнении с длиной волны излучения.

Важное практическое значение строгих решений задач дифракции на различных физических объектах определяется тем, что они играют роль канонических решений, на основе которых строятся приближенные модели дифракции на более сложных структурах, содержащих такие объекты в качестве составных частей. Например, строгое решение Зоммерфельда для дифракции плоской волны на краю проводящей полуплоскости послужило канонической основой геометрической теории дифракции, широко применяемой в теории радиолокации и моделировании антенной техники. Кроме того, строгие дифракционные решения дают возможность получать простые приближенные модели и контролировать эффективность их применения для отдельных частных случаев, допускающих упрощенное теоретическое описание.

Рассматривая эффекты фокусировки, дифракции и преобразования электромагнитных полей в пространстве, в конечном счете имеют в виду воздействие этих полей на некоторые материальные объекты с целью определения их физических свойств (в спектроскопии) или изменения состояния (в фотохимии), а также определения параметров самого поля (частоты, интенсивности, пространственной картины распределения, например, в оптической и радиолокации). Простейшей моделью такого объекта служит плоский диэлектрический слой, на примере которого хорошо видно, что с его появлением меняется пространственная картина дифракционного поля вследствие отражения и преломления на границах слоя, а также поглощения энергии в его объеме. То есть структура поля в диэлектрике и вокруг него будет уже не такой, какой она была бы в его отсутствии в той же области пространства. Данное обстоятельство имеет важное значение для спектроскопии, оптической литографии, интегральной оптики и других приложений. Между тем до настоящего времени в теории дифракции присутствие диэлектриков как моделей объектов воздействия излучения не принималось во внимание, поскольку считалось, что на макроуровне их искажающее воздействие на поле невелико и всегда может быть учтено как дополнительное малое возмущение. Однако в случаях малоразмерных дифракционных объектов порядка длины волны излучения такое допущение нельзя признать справедливым, и потому строгая постановка задачи о дифракции электромагнитной волны на малом отверстии должна включать, помимо самого отверстия в экране, еще и плоский диэлектрический слой за ним как модель объекта электромагнитного воздействия.

Еще одна важная теоретическая проблема – это моделирование пространственной структуры электромагнитных полей, возникающих в результате прохождения световых пучков через многослойные диэлектрические структуры в условиях полного внутреннего отражения и возбуждения волноводных мод в тонких пленках. Подобные режимы прохождения диэлектрических слоев могут рассматриваться как проявление дифракции, поскольку структура преломленного поля здесь не соответствует геометрической оптике. До сих пор для описания полей в слоистых диэлектриках широко используется модель плоской волны, более пригодная для описания световых пучков в обычном режиме свободного распространения в пространстве, когда поперечная структура поля мало меняется в процессе распространения и воспроизводит структуру падающего пучка. Но при полном внутреннем отражении эта модель дает искаженную картину преломленного и волноводного поля, поскольку не учитывает поперечную неоднородность падающего пучка, которая здесь играет важную роль. Пространственную неоднородность лазерных пучков хорошо описывает модель пучка с амплитудой в виде гауссовой функции в поперечном сечении. Однако такая модель тоже имеет ограниченные возможности и применяется только для описания обычного режима свободного распространения в прозрачных средах. Поэтому до сих пор отсутствуют адекватные теоретические модели расчета пространственной структуры преломленного поля в условиях полного внутреннего отражения и нарушенного полного внутреннего отражения световых пучков, несмотря на то, что эти явления уже давно применяются в различных областях науки и техники.

Таким образом, данная работа посвящена разработке строгой теории прохождения электромагнитных волн через поперечно ограниченные дифракционные системы с отверстиями в проводящих экранах и плоскими диэлектриками, которые выполняют роль объектов воздействия излучения в спектроскопии, интегральной оптике и оптической литографии. На основе этой теории проводится теоретический анализ эффекта безлинзовой фокусировки, основные особенности которого характеризуются дифракционной моделью в ближней зоне. Кроме того, в диссертации представлена приближенная аналитическая теория прохождения гауссова светового пучка через плоскостойкие диэлектрические структуры при наличии эффектов полного внутреннего отражения и волноводного возбуждения в различных слоях таких структур.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь: на 2002–2005 годы (подраздел 1.3. Электроника и радиофизика. Физико-технологические основы создания опто-, микро- и наноэлектронных материалов, приборов и систем, обработка оптической информации. Взаимодействие электромагнитных волн с различными средами, принципы проектирования и реализации радиофизических элементов и систем); на 2006–2010 годы (раздел 7. Конкурентоспособные изделия радио-, микро-, нано-, СВЧ- и силовой электроники, микросенсоры, лазерно-оптической техники, разработка новых видов приборов, в том числе для научных целей); на 2011–2015 годы (подраздел 7.5. Методы и средства неразрушающего контроля, технической диагностики, мониторинга и испытаний в процессах производства и эксплуатации машин); на 2016–2020 гг. (раздел 8. Многофункциональные материалы и технологии); на 2021–2025 годы (раздел 1. Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии и основанные на них производства: физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии).

Основные результаты диссертационной работы были получены при выполнении заданий в рамках Государственных программ научных исследований:

ГПОФИ «Электроника», задание 37 «Разработка методов и программно-алгоритмических средств исследования диэлектрических свойств поглощающих материалов в цилиндрических резонансных СВЧ структурах со щелями», № ГР 20021072, 2003–2005; ГПНИ «Техническая диагностика», задание 38 «Разработка микроволновых методов и устройств технологического контроля композиционных свойств листовых гетерогенных материалов» № ГР 20066814, 2006–2008; ГПНИ «Техническая диагностика», задание 51 «Разработка комплексной методики измерения влажности и плотности листовых бумажных материалов с помощью микрополосковых резонансных линий СВЧ» № ГР 20092885, 2009–2010; ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» подпрограммы «Техническая диагностика», задание 4.23 «Исследование и разработка многопараметрических методов и средств комплексного контроля и управления основными технологическими процессами производства бумажных материалов» № ГР 20113680, 2011–2015; ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограммы «Техническая диагностика», задание 3.21 «Разработка физических основ многофункциональной высокоточной технологии измерения

физических параметров гетерогенных диэлектрических материалов электродинамическим методом в условиях сильного затухания излучения» № ГР 20162395, 2016–2018; ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограммы «Техническая диагностика», задание 3.31 «Разработка многопараметрических методов определения содержания сухого вещества в технологических водных суспензиях и растворах с использованием излучения в микроволновом диапазоне электромагнитных волн при условии наличия существенного затухания и иных возмущающих факторов» № ГР 20192801, 2019–2020; ГПНИ «Конвергенция-2025» подпрограммы «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии», задание 3.02.7 «Исследование эффекта фокусировки электромагнитного излучения субволновыми апертурами для целей оптической спектроскопии и нанолитографии», № ГР 20211120, 2021–2025.

Цели, задачи, объект и предмет исследования

Целями работы являются теоретическое описание и исследование пространственной структуры электромагнитных полей оптического и радиодиапазонов при дифракционном прохождении через отверстия в проводящих экранах и плоские диэлектрики за ними, а также при преломлении световых пучков в плоскостойких диэлектрических структурах.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

разработать строгие методы теоретического описания пространственной структуры электромагнитных полей при прохождении через отверстия в идеально проводящих экранах в отсутствие и в присутствии плоских диэлектриков за экраном;

разработать методы оценивания фокусирующих свойств дифракционных систем с микроотверстиями;

разработать аналитические методы описания полей преломления гауссова светового пучка на одной границе между диэлектриками и в многослойных диэлектрических структурах при наличии затухания, полного внутреннего отражения и возбуждения волноводных мод в различных средах.

Объектами исследования являются двумерные электромагнитные поля оптического, микроволнового и радиодиапазонов, возникающие при распространении и дифракции излучения на отверстиях в плоских проводящих экранах и в плоскостойких диэлектрических структурах.

Предмет исследования – амплитудные и фазовые характеристики дифракционных полей, а также закономерности их распределения в пространстве в зависимости от параметров дифракционных систем.

В диссертации везде, за исключением случая кругового отверстия (раздел 4.4), рассмотрение ограничивается монохроматическими двумерными электромагнитными полями, параметры которых вместе с параметрами дифракционных систем могут меняться только по двум пространственным декартовым координатам в одной и той же плоскости распространения. Предполагается, что если у них и проявляются пространственные неоднородности в ортогональном направлении, по третьей пространственной координате, то масштабы этих неоднородностей значительно превышают длину волны излучения и характерные масштабы неоднородностей в плоскости распространения. Тогда поле излучения можно представить в виде суперпозиции двух независимых линейных поляризаций, которые никак не влияют друг на друга и определяются направлением электрического вектора перпендикулярно или параллельно плоскости распространения (Приложение А). При таких условиях поле каждой поляризации будет характеризоваться всего одной скалярной комплексной полевой функцией, которая зависит от координат и является решением уравнения Гельмгольца, причем пространственные компоненты электрического и магнитного полей у каждой поляризации будут выражаться простыми формулами через эту функцию.

В настоящей работе у всех монохроматических полей общий экспоненциальный множитель $\exp(-i\omega t)$, определяющий зависимость от времени t , будет всюду опускаться ($i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица, $\omega = 2\pi c/\lambda$ – круговая частота, λ – длина волны излучения, c – скорость света в вакууме).

Научная новизна

В настоящей работе впервые решены следующие задачи:

1. Предложен метод решения задач электромагнитной дифракции на щелевых структурах в плоских идеально проводящих экранах и найдены строгие решения задач дифракции плоской волны на щели в экране бесконечно малой толщины и на сопряженной полосе. С помощью этих решений проведена оценка асимптотического поведения полей вблизи краев щели и полосы.

2. Разработана методика решения задач дифракции на рассеивающих проводящих препятствиях в присутствии плоских диэлектриков за ними как моделей объектов воздействия излучения, которые оказывают возмущающее влияние на дифракционное поле. В качестве примера применения данной методики получено строгое решение задачи дифракции на полосе и плоском диэлектрическом слое за ней с учетом возможности появления волноводных мод в слое.

3. Разработаны строгие методы решения задач дифракции на щелевых и круговых отверстиях в плоских идеально проводящих экранах конечной толщины в отсутствие и в присутствии параллельных диэлектрических слоев за экраном, влияющих на структуру дифракционного поля. На основе полученных

решений дано теоретическое описание эффекта безлинзовой фокусировки излучения в ближней зоне микроотверстий прямоугольной и цилиндрической геометрии. Предложен простой метод определения условий появления данного эффекта и оценки его величины в зависимости от толщины экрана, размеров отверстия и параметров плоского диэлектрика за экраном.

4. Проведено теоретическое исследование крупномасштабной пространственной структуры преломленного поля при скользящем преломлении и полном внутреннем отражении гауссова светового пучка на плоской границе однородных изотропных диэлектрических сред; предложена аналитическая модель описания такой структуры в приближении малости длины волны излучения по сравнению с шириной падающего пучка.

5. Представлена аналитическая модель приближенного описания поля светового пучка при прохождении плоскостойких диэлектрических структур, которая предполагает малость толщины слоев и длины волны излучения по сравнению с эффективной шириной пучка и позволяет рассматривать разные режимы распространения и затухания поля в различных слоях. В порядке апробации данной модели рассмотрено явление возбуждения волноводных мод призмным методом в условиях нарушенного полного внутреннего отражения и определены оптимальные условия такого возбуждения в зависимости от ширины падающего светового пучка, толщины волноводного слоя и величины зазора между ним и призмой.

Положения, выносимые на защиту

1. Строгие решения задач дифракции плоской электромагнитной волны на щели в плоском идеально проводящем экране бесконечно малой толщины и на сопряженной полосе.

2. Теоретический метод аддитивной регуляризации для вычисления сингулярных дифракционных интегралов, которые описывают прохождение электромагнитного излучения через плоскостойкие диэлектрики с возбуждением в них волноводных мод.

3. Строгие решения задач дифракции электромагнитной волны на одной щели, на двух близких щелях и на круговом отверстии в идеально проводящих экранах произвольной толщины в отсутствие и в присутствии за экранами плоских диэлектриков.

4. Дифракционная модель явления безлинзовой фокусировки излучения в ближней зоне щелевых и круговых микроотверстий в идеально проводящих экранах, которая позволяет оценить величину эффекта в зависимости от размеров отверстий, толщины экранов и положения диэлектрического слоя, фиксирующего дифракционное изображение отверстия.

5. Теоретическое описание пространственной структуры преломленного поля светового пучка при скользящем преломлении и при полном внутреннем

отражении на границе двух однородных прозрачных сред, когда поле демонстрирует сильную пространственную расходимость непосредственно у самой границы, нелинейную зависимость фазы от пространственных координат, а также неэкспоненциальный характер затухания амплитуды по глубине преломляющей среды.

6. Метод приближенного аналитического описания поля гауссова пучка при прохождении многослойных диэлектрических структур с малой толщиной слоев, когда в разных слоях проявляются эффекты свободного распространения, поглощения, скользящего преломления, полного внутреннего отражения излучения и возбуждения волноводных мод.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы полностью отражает вклад соискателя в разработку новых методов теории дифракции на щелевых и круговых апертурах в присутствии плоских диэлектриков и прохождения световых пучков через многослойные диэлектрические структуры. Все результаты диссертационной работы, выносимые на защиту и определяющие ее научную и практическую значимость, получены автором самостоятельно без участия иных лиц.

Обоснованность выводов диссертации.

Для решений задач дифракции на отверстиях в проводящих экранах достоверность полученных результатов обеспечивается строгим подходом к построению решений уравнений Максвелла при выполнении граничных условий. Для приближенных решений данных уравнений в виде поля преломления гауссова пучка достоверность результатов исследования гарантируется методом построения таких решений, когда приближенные аналитические формулы непосредственно выводятся как упрощенные аппроксимации точных решений в виде интегралов Фурье, полученных численным подсчетом этих интегралов при различных условиях.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, включенных в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях и симпозиумах:

14-й Международной конференции «Mathematical Methods in Electromagnetic Theory» (Украина, 28–30 августа 2012 г.); IX Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 18–23 ноября 2013 г.); 26-м Международном симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology» (Минск, 18–22 июня 2018 г.); Международной конференции «NANOMEETING–2019» (Минск, 21–24 мая 2019 г.); 28-м Международном симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology» (Минск, 28 сентября – 2 октября 2020 г.); 6-й Международной научно-практической конференции

«Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 20–21 мая 2021 г.); 7-й Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 18–19 мая 2023 г.); XIV Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 21–24 ноября 2023 г.); на объединенном общегородском семинаре по электродинамике и антеннам памяти Я. Н. Фельда (Москва, 4 марта 2025 г.).

Строгие методы расчета полей дифракции на отверстиях в непрозрачных экранах с диэлектриками, представленные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ при изучении дисциплины «Вычислительная радиофизика» студентами 1 курса второй ступени высшего образования по специальности 7-06-0533-03 «Радиофизика и информационные технологии» (акт о практическом использовании результатов исследования от 27 июня 2025 г. № 24/225). Эти методы использовались при теоретическом моделировании микроволновых датчиков влагосодержания листовых бумажных и сыпучих зерновых материалов, сконструированных на основе объемных цилиндрических резонаторов со щелями и применяемых в системах контроля технологическими процессами в целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности. Результаты диссертационной работы по расчету полей дифракции на щелевых структурах использовались также при разработке теоретической модели оптического литографического процесса для микроэлектронной промышленности.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах, из которых 18 – статьи в рецензируемых научных изданиях, т.е. в белорусских, российских и зарубежных англоязычных журналах в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и ученых званий (общим объемом 12 авторских листов), 2 – статьи в других зарубежных изданиях, 8 – статьи в сборниках материалов научных конференций, и 1 – тезисы доклада на международной научной конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из списка терминов и определений, введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, списка использованных литературных источников и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 270 страниц, в том числе 67 рисунков на 59 страницах, 2 таблицы на 2 страницах и 3 приложения на 37 страницах. Список использованных источников, включающий собственные публикации соискателя ученой степени, содержит 317 наименований (на 23 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** дается краткий литературный обзор и сравнительный анализ строгих и приближенных теоретических методов решения задач дифракции электромагнитных волн на отверстиях в плоских проводящих экранах. Кроме того, в этой главе приводятся известные литературные данные по теории гауссовых пучков как модели распространения реальных лазерных пучков в диэлектрических средах.

Во **второй главе** рассмотрены строгие решения задач дифракции плоской электромагнитной волны на бесконечно тонких частично ограниченных идеально проводящих плоских экранах. Сначала рассматривается задача, которую в строгой постановке не удавалось решить более 100 лет. Это задача дифракции плоской волны

$$u_0(x, y) = \exp [ik(\alpha_0 x + \beta_0 y)] \quad (1)$$

на щели в бесконечно тонком идеально проводящем экране и на сопряженной полосе (рисунок 1). Здесь $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны излучения, $\alpha_0 = (1 - \beta_0^2)^{1/2}$. По примеру Зоммерфельда, ее решение стремились построить методом композиции двух разных решений для двух независимых краев щели или полосы. Однако оба рассеивающих края образуют единую

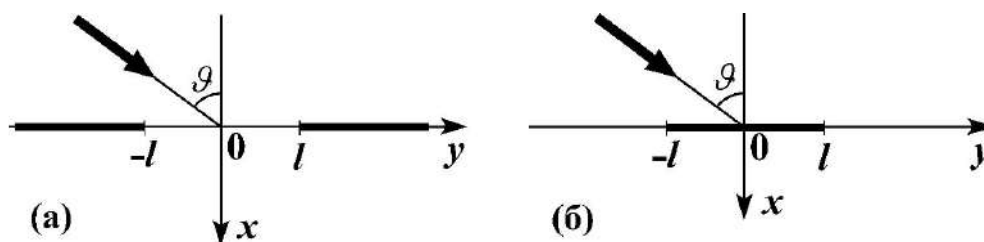


Рисунок 1 - Дифракция плоской волны на щели в тонком плоском экране (а) и на тонкой полосе (б) [5, с. 183; 10, с. 39]

физическую систему, и здесь нужно применять иной подход, исходящий из пространственной ограниченности области существования касательных компонент поля на щели или тока на полосе. Он предписывает использовать для них разложение в дискретный ряд Фурье по синусоидальным модам щели или полосы [5, с. 184, 185; 10, с. 38]:

$$u(y) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n^{(s)} \cos(k\xi_n^{(s)} y) + ia_n^{(a)} \sin(k\xi_n^{(a)} y) \right\} & \text{при } -l \leq y \leq l \\ 0 & \text{при } y < -l; y > l \end{cases}, \quad (2)$$

где l – полуширина щели, $a_n^{(s,a)}$ – амплитуды симметричных (верхний индекс «(s)») и антисимметричных (индекс «(a)») по y фурье-компонент с пространственными частотами [3, с. 280, 281; 5, с. 184, 185]

$$\xi_n^{(s)} = \frac{\pi}{kl} \left(n - \frac{1+\nu}{2} \right), \quad \xi_n^{(a)} = \frac{\pi}{kl} \left(n - \frac{\nu}{2} \right), \quad (3)$$

$\nu = 0$ для H -поляризации поля с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости падения волны, и $\nu = 1$ для E -поляризации с электрическим вектором, параллельным данной плоскости. При этом дифракционные поля в полупространствах вне плоскости экрана со щелью (полосой) строятся, как обычно, в виде интегралов Фурье [3, с. 280,281; 5, с. 183, 184]:

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\beta) \exp[ik(\alpha x + \beta y)] \alpha^{-\nu} d\beta \quad \text{при } x \geq 0, \quad (4)$$

где $A(\beta)$ – амплитуды плоских волн (мод) непрерывного спектра с параметрами распространения по нормальной оси x [5, с. 183]

$$\alpha = \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (5)$$

для которых берется ветвь корня с неотрицательной мнимой частью. Условия непрерывности полевой функции u и ее нормальной производной по обе стороны щели дают систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных амплитуд мод внутри щели $a_n^{(s,a)}$ и вне ее $A(\beta)$. Тем самым определится искомое строгое решение для функции u (2), (4) в этих областях существования поля, с помощью которой вычисляются пространственные компоненты электрического и магнитного векторов во всех точках пространства [5, с. 184–186]. В качестве примера такого расчета на рисунке 2 показаны в одном масштабе пространственные распределения амплитуд разных

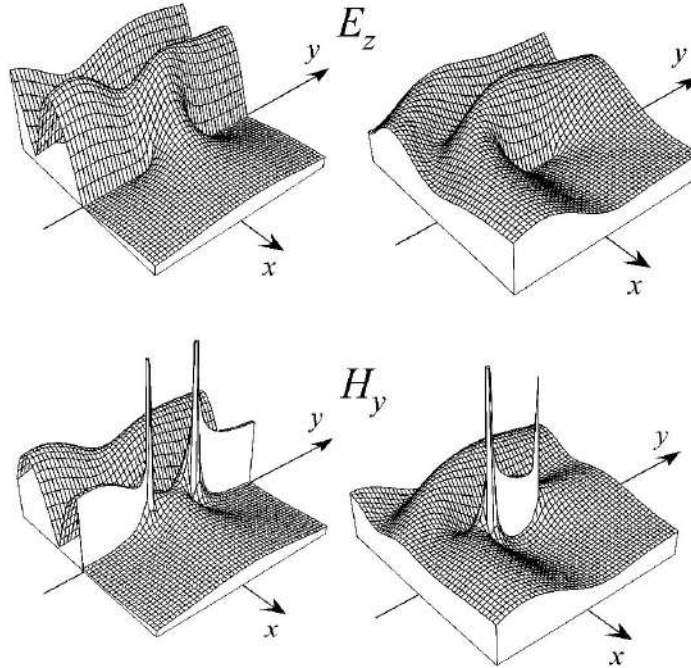


Рисунок 2 – Пространственное распределение величины компонент электрического и магнитного поля при дифракции H -поляризованной плоской волны на щели (слева) и на полосе (справа) [5, с. 187; 12, с. 40]

компонент электрического и магнитного полей, вычисленные для случая, когда волна (1) H -поляризации со стороны отрицательных x и y падает под углом $\vartheta = 30^\circ$ на экран со щелью (на полосу) с безразмерной шириной $2kl = 2,4$.

С помощью нового метода асимптотических оценок фурье-разложений (2) исследован характер поведения дифракционного поля непосредственно вблизи краев щели (полосы) и вдали от них, ближе к середине щели [6, с. 211–216]. Как и следовало ожидать по аналогии со случаем полуплоскости, вблизи краев асимптотика поля носит степенной характер с показателями степени по величине меньшими единицы [6, с. 215, 216]. Это означает, что локальная плотность энергии всюду интегрируема, и такой результат не противоречит физике задачи. Однако в случаях щели или полосы для показателя степени получаются несколько иные результаты, чем для полуплоскости, где степенная асимптотика электрического поля характеризуется показателями степени $1/2$ и $-1/2$ у H - и E -поляризаций соответственно. Для щели эти показатели приближенно равны $0,61$ и $-0,39$. При этом моды щели (полосы) (2) различного порядка вносят разный вклад в суммарное поле на разном расстоянии от ее краев. Если моды низкого порядка с малой пространственной частотой формируют характер поля на сравнительно больших расстояниях от каждого края, т.е. вблизи середины щели, то моды высшего порядка с большим n определяют поле непосредственно вблизи краев [6, с. 216]. Поэтому для микрощелей (полос) малой ширины порядка длины волны и менее нужно учитывать большое число мод высокого порядка, распространяющихся и затухающих от экрана (полосы). И чем меньше ширина щели, тем большее число мод надо принимать во внимание (обычно не менее одной-двух сотен).

В **третьей главе** по аналогии с решением задачи дифракции на одиночной полосе построено строгое решение для дифракционного объекта, включающего, кроме полосы в плоскости $x = 0$ между средами 1 и 2, еще и параллельный диэлектрический слой (среда 3; рисунок 3). Оказалось, что при наличии ограниченного диэлектрика с двумя параллельными границами дифракционные интегралы, определяющие поля в средах 2, 3 и 4, становятся сингулярными. У них появляются полюсы, которые физически соответствуют

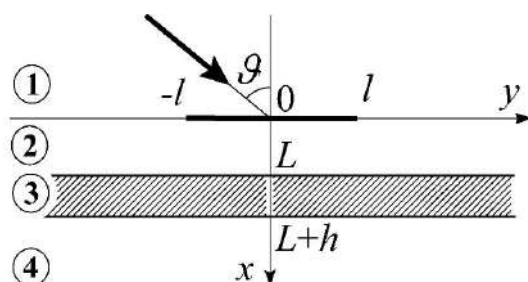


Рисунок 3 – Дифракция плоской волны на проводящей полосе и параллельном диэлектрическом слое [7, с. 44]

волноводным модам плоского диэлектрического волновода. В этом случае кроме обычного ненаправленного поля рассеяния на ограниченной полосе, которое убывает на бесконечности, дифракционные интегралы описывают еще и неубывающее направленное поле волноводного резонанса. При вычислении сингулярных интегралов с полюсами применялся метод аддитивной регуляризации, общая схема которого может быть проиллюстрирована формулой [7, с. 45; 10, с. 137]:

$$\int_0^{+\infty} \frac{f(\beta)}{D(\beta)} d\beta = \int_0^{+\infty} \left(\frac{f(\beta)}{D(\beta)} + ip \sum_{j=1}^J \frac{f(\beta_j)}{\Gamma_j \operatorname{sh}[p(\beta - \beta_j - is_j)]} \right) d\beta - \\ - ip \sum_{j=1}^J \frac{f(\beta_j)}{\Gamma_j} \int_0^{+\infty} \frac{d\beta}{\operatorname{sh}[p(\beta - \beta_j - is_j)]}, \quad (6)$$

где $f(\beta)$ и $D(\beta)$ – регулярные функции на положительной вещественной полуоси аргумента β , причем функция D имеет конечное число J нулей на этой полуоси или вблизи нее, а суммирование ведется по всем точкам β_j на вещественной полуоси, ближайших к этим нулям, $p = \pi k(\lambda^4 + l^4)^{1/4}$, Γ_j и s_j – параметры, пропорциональные величинам производной функции D и самой этой функции в точках минимумов ее модуля $\beta = \beta_j$ [10, с. 137]:

$$\Gamma_j = q_j \sqrt{1 + p^2 S_j^2}, \quad s_j = p^{-1} \operatorname{arctg}(p S_j), \quad q_j = -i D'(\beta_j), \quad S_j = i D(\beta_j) / D'(\beta_j),$$

где штрихом обозначена производная по аргументу. Формула (6) исходит из приближения $D \approx i q_j (\beta - \beta_j - i S_j)$ или $D \approx -q_j [p(\beta - \beta_j) - i \operatorname{tg}(p s_j)] / (ip)$ для поведения функции D вблизи этих минимумов. Наличие полюсов (нулей функции D) вблизи точек $\beta = \beta_j$ у интеграла в (6) компенсируется путем введения под интеграл слагаемых (под знаком суммы), каждое из которых вблизи данных минимумов имеет такую же полюсную сингулярность, как функция $-f/D$, и добавлением интегралов от идентичных слагаемых, но с обратным знаком. У каждого из этих слагаемых, внутри и вне большого интеграла, линейную зависимость от $\beta - \beta_j$ удобней заменить на гиперболический синус с добавлением большого коэффициента p , что не меняет характера этих зависимостей вблизи полюсов, но заметно ограничивает область определения подынтегральных функций и упрощает вычисление соответствующих интегралов. Тем самым разделяются вклады нерезонансного рассеянного поля (первый интеграл в правой части (6)) и полей отдельных волноводных мод (остальные интегралы) в суммарном дифракционном поле [10, с. 142].

В **четвертой главе** представлена строгая теория дифракции на отверстиях прямоугольной и цилиндрической геометрии в плоских идеально проводящих экранах конечной толщины (рисунок 4), построенная на основе

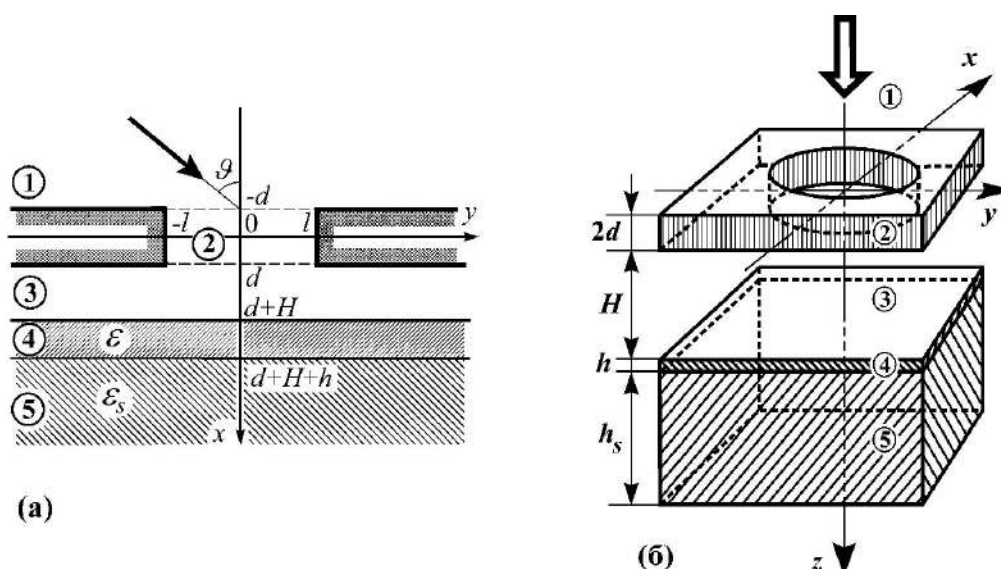
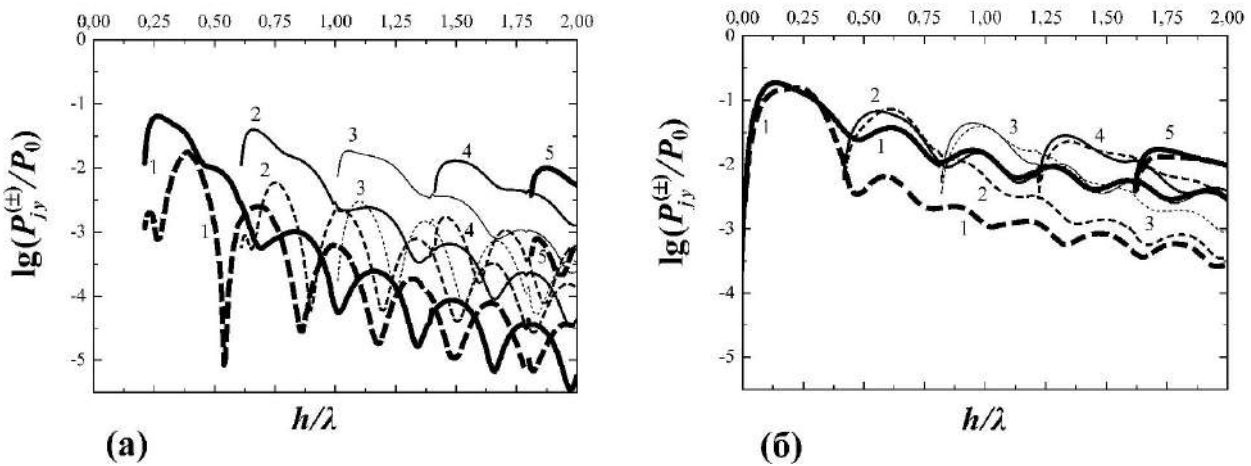


Рисунок 4 – Дифракция волны на щели (а) и на круговом отверстии (б) в плоском экране конечной толщины в присутствии плоского диэлектрического слоя на подложке за экраном [10, с. 131; 17, с. 100]

метода собственных мод, или частичных областей. Решения подобных задач для щелей были известны и ранее, но они давали устойчивые алгоритмы вычислений только для толстых экранов. Применение процедуры тихоновской регуляризации к системе линейных алгебраических уравнений для амплитуд внутрищелевых мод позволяет расширить область применения теории на случаи проводящих экранов произвольной толщины, в том числе экранов толщиной порядка длины волны и менее [2, с. 114–117]. Данная теория дает возможность рассчитать пространственную амплитудно-фазовую структуру поля в любой области пространства с учетом дополнительного присутствия плоских диэлектриков за экраном, которые могут служить детекторами излучения, а также объектами литографической засветки или спектроскопических исследований. В этом состоит новизна представленного подхода, который позволяет рассчитывать пространственную картину поля во всем пространстве с учетом возможности возбуждения волноводных мод в прозрачном или слабопоглощающем диэлектрическом слое, используя метод аддитивной регуляризации [10, с. 145–148], а также вычислять амплитуды возбуждаемых волноводных мод (рисунок 5)*. Похожим методом найдено строгое решение задачи дифракции нормально падающей плоской волны на круговом отверстии в идеально проводящем экране конечной толщины в отсутствие и в присутствии плоского диэлектрического слоя за экраном [17, с. 101–108].

В оптической литографии большое значение имеет проблема пространственного разрешения дифракционных изображений близкорасположенных отверстий. Поэтому в работе также рассмотрена строгая модель дифракции

* На рисунке 5 цифры при кривых обозначают номер каждой моды.



Полуширина щели $l = 0,5\lambda$, полутолщина экрана $d = 0,6\lambda$, угол падения волны на экран $\vartheta = 30^\circ$; сплошными линиями и пунктиром показаны результаты для мод, распространяющихся в противоположных направлениях относительно границ слоя

Рисунок 5 – Зависимость относительной эффективности дифракционного возбуждения волноводных мод H -поляризации (а) и E -поляризации (б) в прозрачном диэлектрическом слое от его толщины [10, с. 146]

волны на экране с двумя близкими щелями. С ее помощью показано, что дифракционное поле такой системы представляет собой суперпозицию полей от каждой из двух щелей по отдельности, отличаясь от нее только на малых расстояниях (до $0,1-0,2\lambda$) от экрана в пространстве между щелями [15, с. 82].

В **пятой главе** на основе развитой теории проводится анализ явления безлинзовой дифракционной фокусировки электромагнитного излучения в ближней зоне щелевых и круговых микроотверстий и предлагается простая методика определения условий, при которых данное явление возникает в зависимости от геометрических параметров дифракционной системы (толщины проводящего экрана, ширины щели или радиуса кругового отверстия, толщины диэлектрического слоя за экраном). Методика базируется на использовании интегрального параметра фокусировки изображения щели [13, с. 2]

$$F = l/l_{\text{eff}} = 2lW_3/(W_1W_2), \quad (7)$$

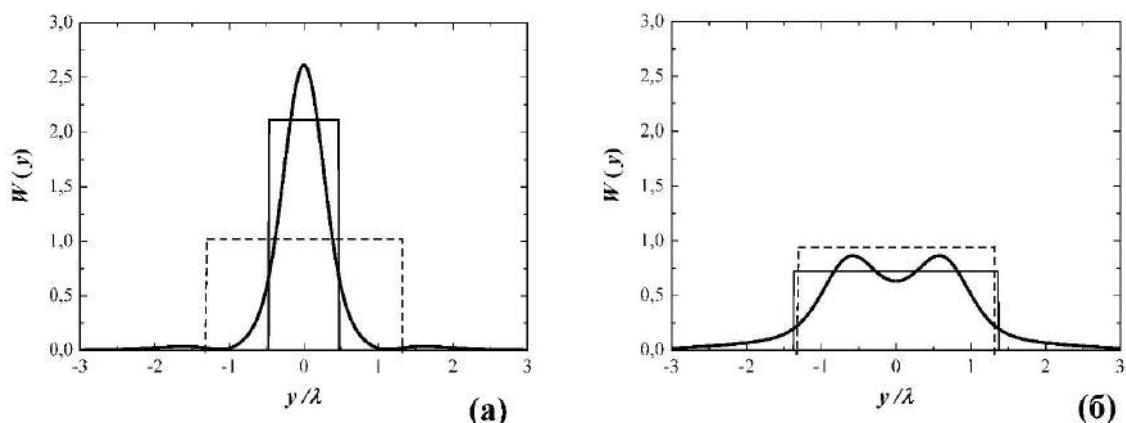
где $l_{\text{eff}} = W_1W_2/(2W_3)$ – эффективная полуширина дифракционного изображения в плоском диэлектрическом слое, который выполняет роль детектора излучения. Здесь используются интегралы [13, с. 2]

$$W_m = \int_{-\infty}^{+\infty} W^m(y) dy, \quad W(y) = \varepsilon \frac{1}{W_0 h} \int_{d+H}^{d+H+h} |E(x, y)|^2 dx,$$

причем последняя величина представляет собой относительную плотность энергии электрического поля в тонком диэлектрическом слое, усредненную по его глубине h (рисунок 4), W_0 – плотность электрической энергии падающей

плоской волны, ε – диэлектрическая проницаемость слоя, $E(x,y)$ – величина электрического поля внутри него, зависящая от координат. Аналогичным образом определяется параметр фокусировки для кругового отверстия [18, с. 110]. Чем больше величина параметра фокусировки (7), тем меньше размер дифракционного изображения отверстия, так что по величине этого параметра можно определять области существования искомого эффекта и оценивать его величину.

Расчеты показали, что эффект проявляется только для H -поляризации излучения (рисунок 6), причем его появление очень чувствительно к изменениям указанных параметров, особенно ширины щели (радиуса отверстия). Иногда достаточно совсем небольшого ее изменения, порядка 0,1–0,3 длины волны излучения, чтобы эффект стал практически незаметным (рисунок 7) [13, с. 3; 18, с. 110]. Вероятно, именно по этой причине он был открыт довольно поздно и до сих пор мало исследован.



Тонкой линией показано эквивалентное равномерное распределение интенсивности изображения, пунктир воспроизводит ширину щели

Рисунок 6 – Распределение плотности электрической энергии у дифракционного изображения щели в диэлектрической пленке толщиной $h/\lambda = 1,2$, возникающего в результате дифракции нормально падающей плоской волны TE - (а) и TM -поляризации (б) на щели полушириной $l/\lambda = 1,32$ в идеально проводящем экране полутолщиной $d/\lambda = 1,2$ при толщине воздушной прослойки $H/\lambda = 0,6$ [13, с. 5]

У кругового отверстия эффект безлинзовой фокусировки проявляется слабее, поскольку интенсивность его изображения с удалением от середины спадает медленнее, чем интенсивность дифракционной картины щели в аналогичных условиях. Зато у такого отверстия локальная интенсивность максимума изображения в несколько раз выше, чем у щели, то есть для него сильнее проявляется другой эффект – аномально высокой интенсивности проходящего излучения [18, с. 110, 111].

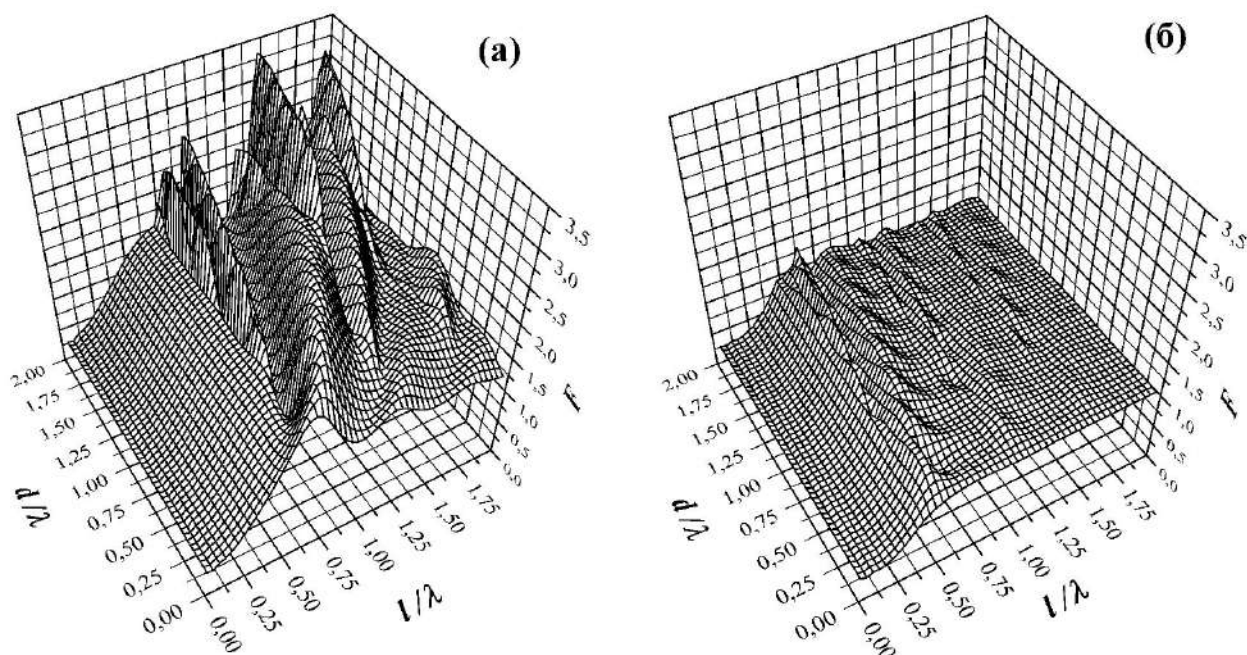


Рисунок 7 – Зависимость параметра фокусировки F изображения щели в пленке толщиной $h/\lambda = 1,2$ от полуширины щели l и полутолщины идеально проводящего экрана d для H - (а) и E -поляризации (б) нормально падающей плоской волны в случае, когда толщина воздушной прослойки H составляет $0,2\lambda$ [13, с. 4]

Результаты данной главы показывают, что последовательной теории дифракции электромагнитной волны на щелевом и круговом микроотверстии в идеально проводящем экране оказывается достаточно, чтобы объяснить основные закономерности явлений аномально высокой локальной интенсивности и безлинзовой фокусировки в ближней зоне такого отверстия, не привлекая дополнительные представления о поверхностных плазмонах на поверхности проводящего экрана как источниках амплитудных аномалий.

В заключении главы 5 рассмотрен вопрос о границах применимости представленной теории, который вследствие строгого характера последней сводится к оценке ее исходных посылок, а именно к определению области применения модели идеального проводника к реальным металлам. По обе стороны идеально проводящего экрана поля не связаны между собой, поэтому реальный проводник можно рассматривать как идеальный, если средняя глубина проникновения поля вглубь него, характеризующаяся как толщина скин-слоя δ , оказывается много меньше его толщины, которую допустимо считать величиной порядка длины волны λ и более. В оптическом диапазоне условию $\delta/\lambda \ll 1$ удовлетворяют почти все металлы, поэтому для данного диапазона представленная теория должна давать хорошие результаты.

В **шестой главе** теоретически исследуется пространственная структура полей преломления световых пучков ограниченного поперечного сечения на

плоской границе изотропных диэлектриков. Рассматривается преломление гауссова пучка [8, с. 844; 11, с. 1574]

$$u_i(x, y) = \frac{1}{\sqrt{1+i\xi_0}} \exp\left(ik(\alpha_{1b}x + \beta_b y) - \frac{(y - x\beta_b/\alpha_{1b})^2}{w^2(1+i\xi_0)}\right), \quad (8)$$

на границе двух диэлектрических сред с учетом наличия поглощения во второй среде (рисунок 8). Здесь параметр дифракционной расходимости пучка [11, с. 1574]

$$\xi_0 = kL_0/(2n_1p_0^2) = L_0/(n_1w_0p_0), \quad (9)$$

причем величина L_0 определяет расстояние, пройденное пучком в среде от плоскости перетяжки, где эффективная ширина пучка $2w_0$ наименьшая, n_1 – показатель преломления среды, $p_0 = kw_0/2$ – спектральный параметр, $\beta_b = n_1 \sin \vartheta$

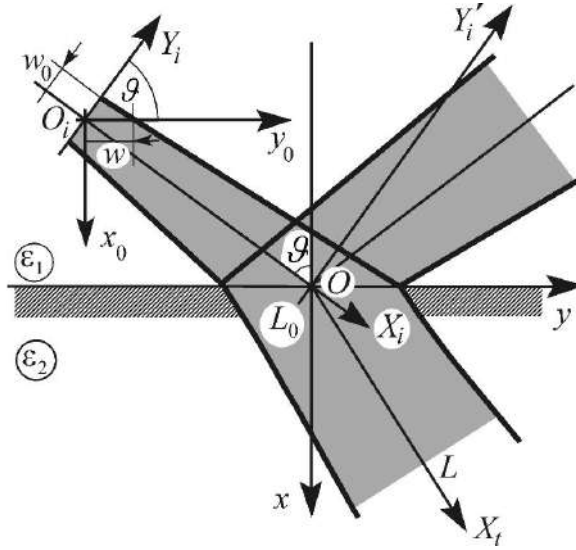


Рисунок 8 – Отражение и преломление светового пучка на границе двух диэлектрических сред [14, с. 2084; 27]

и $\alpha_{1b} = n_1 \cos \vartheta$ – параметры распространения пучка в целом по тангенциальной оси y и по нормальной оси x , ϑ – угол падения пучка на границу раздела $x = 0$, $w = w_0/\cos \vartheta$. Это же поле (8) может быть записано в виде интеграла Фурье [8, с. 844]:

$$u_i(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(\beta) \exp[ik(\alpha_1 x + \beta y)] d\beta, \quad (10)$$

где величина [8, с. 844]

$$U(\beta) = p(\pi)^{-1/2} \exp[-p^2(\beta - \beta_b)^2(1+i\xi_0)] \quad (11)$$

определяет пространственный спектр гауссова пучка, $p = p_0/\cos \vartheta$, β и $\alpha_1 = (\varepsilon_1 - \beta^2)^{1/2}$ – параметры распространения каждой плосковолновой компоненты поля (10) по тангенциальной оси y и по нормальной оси x , $\varepsilon_1 = n_1^2$.

До недавнего времени общая теория описывала картину преломления пучка (8) только для углов падения ϑ , меньших критического, когда среда прозрачная и преломленный пучок свободно в ней распространяется. В данной работе получено обобщение теории на случаи поглощающей среды и затухающего поля пучка. Особое внимание уделено случаю скользящего преломления, когда исходный гауссов пучок падает на преломляющую среду под углом ϑ , равным или близким к критическому. Применительно к этому случаю исследуется точное решение для преломленного поля в виде интеграла Фурье [16, с. 2]

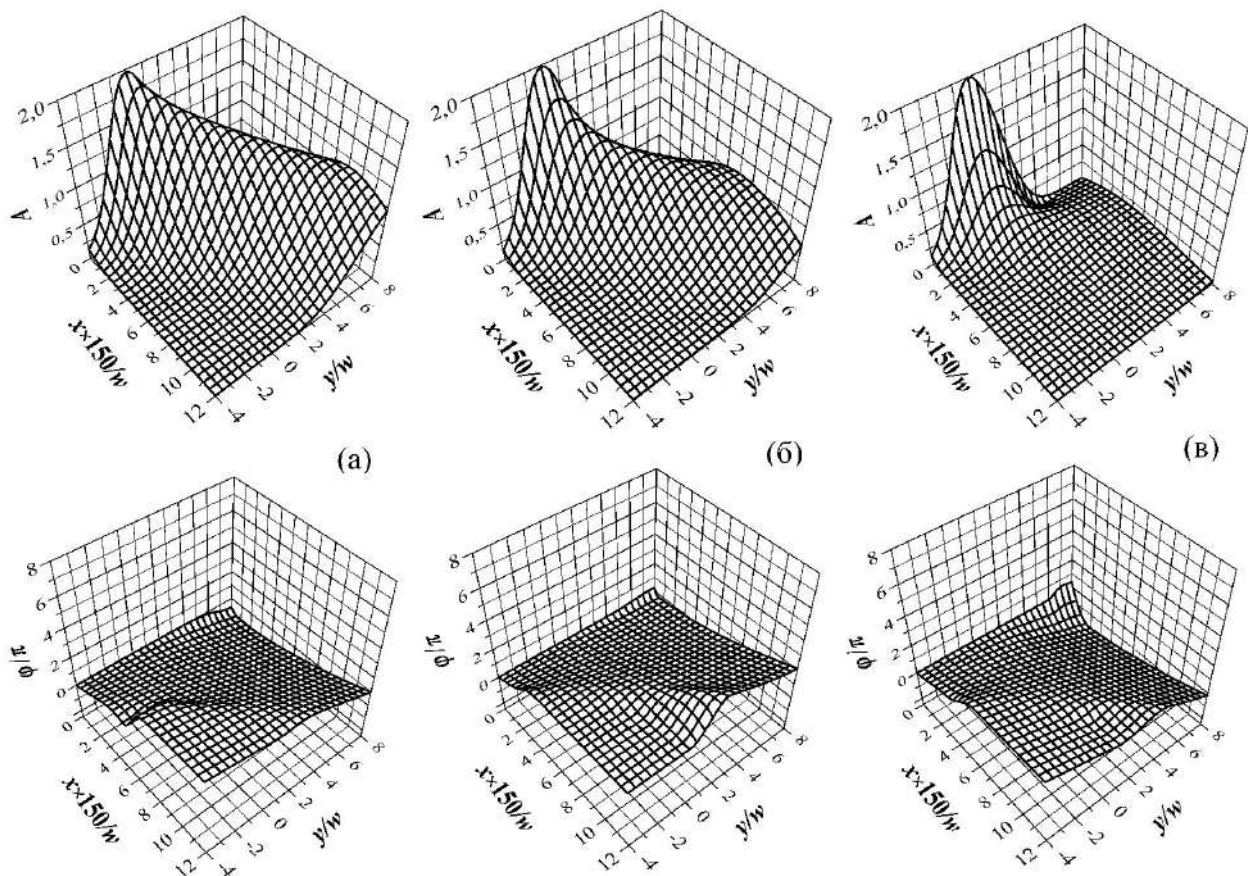
$$u_t(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\beta) U(\beta) \exp[ik(\alpha_2 x + \beta y)] d\beta, \quad (12)$$

которое порождается полем падающего пучка (10), каждая плосковолновая компонента которого с амплитудой U характеризуется параметром распространения $\alpha_2 = (\varepsilon_2 - \beta^2)^{1/2}$ по нормали x и френелевским коэффициентом прохождения через границу [16, с. 2]

$$T(\beta) = \frac{2\varepsilon_1^V \alpha_1}{\varepsilon_2^V \alpha_1 + \varepsilon_1^V \alpha_2}. \quad (13)$$

В качестве точного решения берутся результаты численного подсчета интеграла (12) по формуле средних при разных углах падения. Вычисления показали, что структура поля преломления гауссова пучка в условиях скользящего преломления существенно отличается от структуры поля пучка в режимах обычного распространения и сильного затухания (рисунки 9).

Во-первых, такое поле в преломляющей среде является одновременно и распространяющимся, и затухающим от границы, поскольку ширина пространственного спектра (11) конечная. Поэтому при равенстве усредненного угла падения пучка (8) критическому углу для части волн интегральной суммы (10) будет иметь место превышение угла падения над критическим углом и экспоненциальное затухание вглубь преломляющей среды, а для другой части волн (10) угол падения остается меньше критического, и такие волны характеризуются обычным режимом распространения после преломления. Во-вторых, даже на очень малых расстояниях от границы преломленное поле демонстрирует свойства, характерные скорее не для ближней, геометрической зоны распространения пучков, а для дальней френелевской зоны, обычно локализованной на больших дистанциях распространения. Это дифракционное уширение поперечного сечения не связано с дифракционным уширением падающего гауссова пучка (рисунок 10), и нелинейная зависимость фазы поля от координат также никак не связана с искривлением фазового фронта этого пучка. Они явно заметны у



Размер масштаба по нормальной оси x увеличен в 150 раз по сравнению с размером масштаба по тангенциальной оси y

Рисунок 9 – Пространственное распределение амплитуды (A) и фазы (φ) (без учета фазового множителя $\exp(ik\beta_b y)$) поля преломления гауссова пучка полушириной $w_0 = 2 \cdot 10^3 \lambda$ на границе двух прозрачных сред с показателями преломления 1,6 и 1,4, рассчитанное с помощью точного решения (1.49) для трех различных значений угла падения пучка на границу, когда он меньше критического на 10° (а), равен критическому ($\beta_b = \beta_c$) (б), и больше критического на 20° (в) [14, с. 2087; 27]

преломленного поля сразу вблизи границы. Кроме того, траектория смещения максимума амплитуды поля по глубине преломляющей среды представляет собой кривую, вдоль которой амплитуда поля демонстрирует затухание не по экспоненциальному закону с постоянным коэффициентом затухания, а с плавным его уменьшением при удалении от границы (рисунок 11) [14, с. 2087, 2088]. Все эти особенности пространственной структуры преломленного поля при скользящем преломлении не характерны для прозрачных однородных изотропных сред и скорее соответствуют сильнопоглощающим неоднородным металлам.

Если эффективная ширина светового пучка много больше длины волны излучения, то обычную теоретическую модель гауссова пучка можно модифицировать таким образом, что она станет применимой для описания

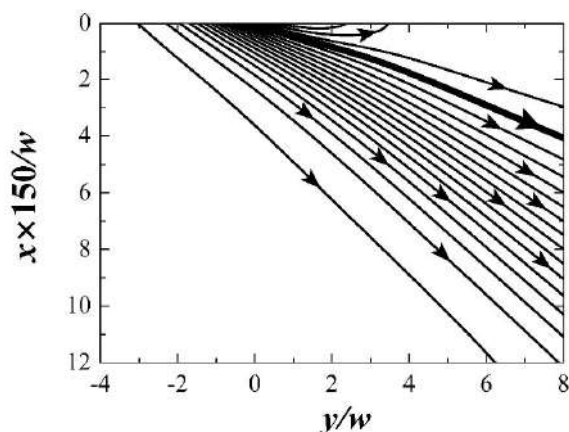
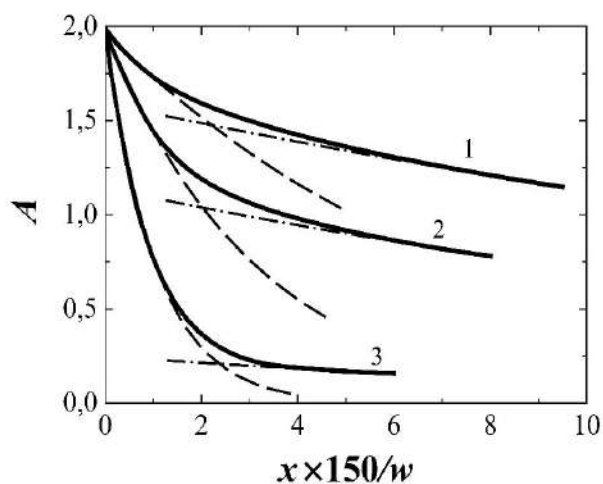


Рисунок 10 –Линии тока энергии *TE*-поляризованного преломленного поля при точном выполнении условия скользящего преломления ($\beta_b = \beta_c$) для случая, представленного на рисунке 9б [14, с. 2088; 27]

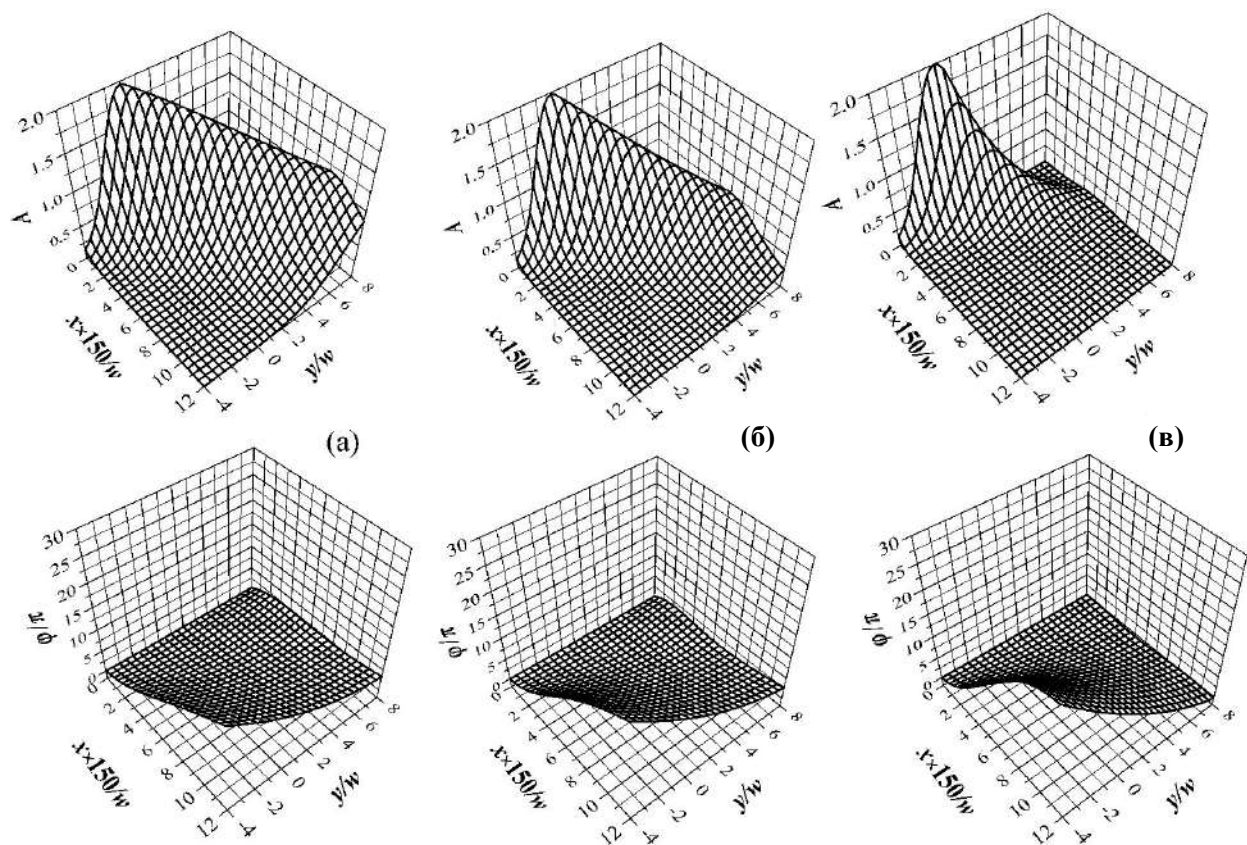


$\delta = -10''$ (1), $\delta = 0$ (2), $\delta = +20''$ (3).

Показаны кривые, соответствующие экспоненциальному затуханию амплитуды по глубине среды на границе (пунктир) и на максимальном удалении от нее (штрих-пунктир) на краю области, изображенной на рисунке 9

Рисунок 11 – Изменение максимального значения амплитуды поля по глубине преломляющей среды при трех различных отклонениях δ угла падения пучка от угла скользящего преломления [14, с. 2088; 27]

аномальных режимов преломления светового поля, таких как полное внутреннее отражение и волноводное возбуждение. Сложнее обстоит дело со скользящим преломлением, когда угол падения пучка на границу раздела сред близок к критическому, потому что тогда амплитуда и фаза преломленного поля проявляют явно не экспоненциальные зависимости от пространственных координат. Тем не менее, и в этом случае удалось получить приближенную экспоненциальную модель описания поля, которая в общем и целом характеризует особенности его пространственной структуры при полном внутреннем отражении (рисунок 12) [16, с. 3–5].



Размер масштаба по нормальной оси x увеличен в 150 раз по сравнению с размером масштаба по тангенциальной оси y

Рисунок 12 – Пространственное распределение амплитуды (A) и фазы (φ) (без учета фазового множителя $\exp(ik\beta_h y)$) поля преломления гауссова пучка полушириной $w_0 = 2 \cdot 10^3 \lambda$ на границе двух прозрачных сред с показателями преломления 1,6 и 1,4, рассчитанное с помощью приближенного решения (6.7) для трех различных значений угла падения пучка на границу, когда он меньше критического на 10° (а), равен критическому (б) ($\beta_b = \beta_c$), и больше критического на 20° (в) [16, с. 5; 26]

В **седьмой главе** на основе обобщенной гауссовой модели светового поля построена приближенная аналитическая теория прохождения светового пучка через многослойные диэлектрические структуры, когда в разных слоях могут проявляться различные эффекты: свободное распространение, скользющее преломление, полное внутреннее отражение и волноводное возбуждение [11, с. 1574–1576; 18, с. 182–185]. Данная теория может применяться при условии малости длины волны излучения и толщины всех ограниченных диэлектрических слоев по сравнению с шириной падающего светового пучка. В качестве примера ее применения рассмотрена 4-слойная диэлектрическая система нарушенного полного внутреннего отражения, которая моделирует призмную схему возбуждения волноводных мод в тонких диэлектрических пленках (рисунок 13), когда в воздушном зазоре 2 между призмой 1 и пленкой 3, а также в подложке 4, на которой размещена пленка 3, поле экспоненциально

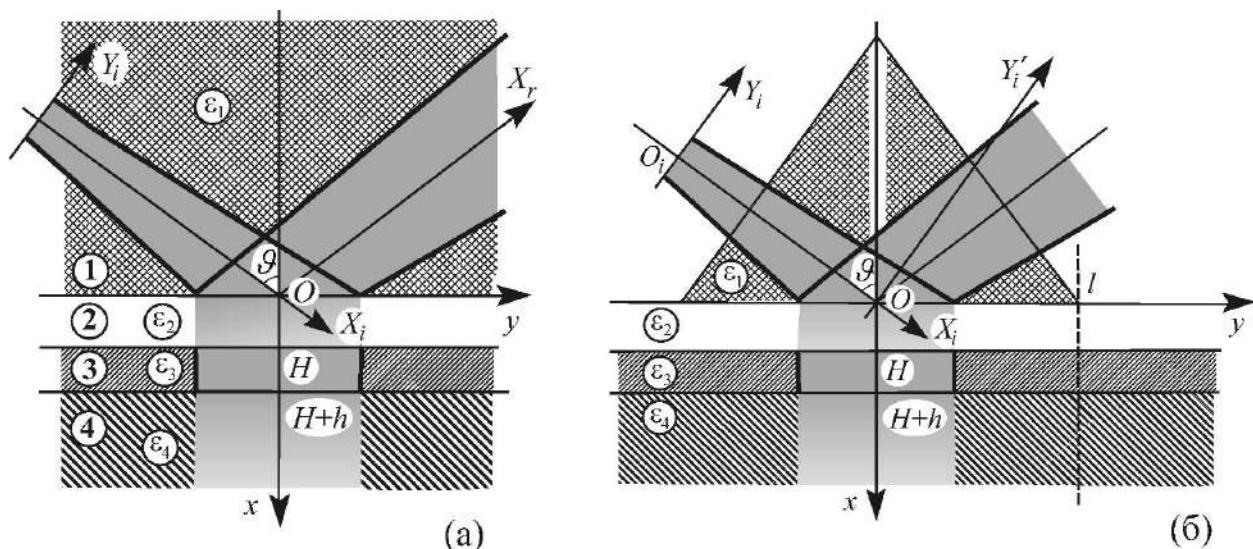
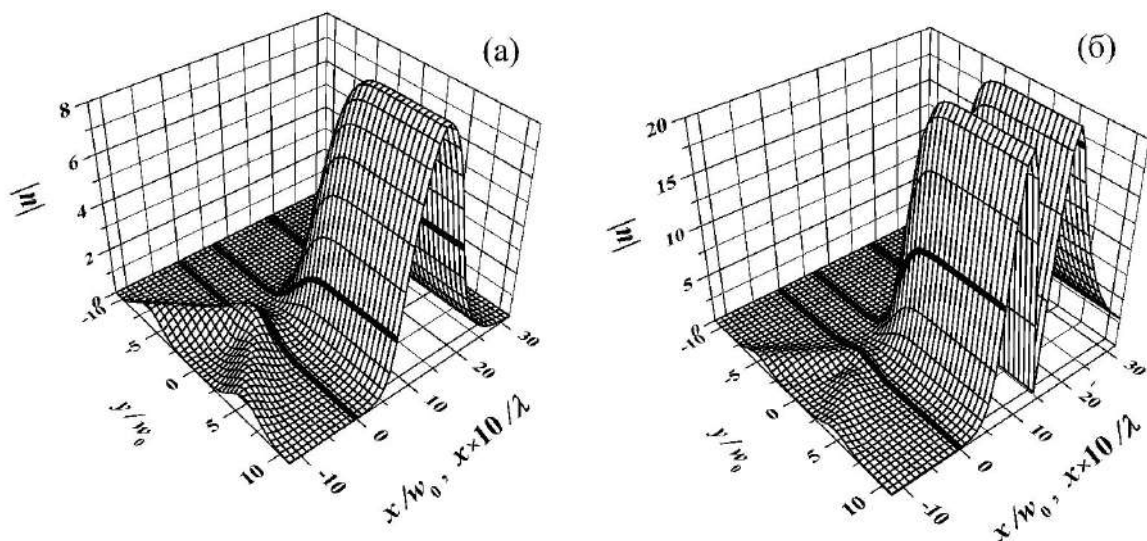


Рисунок 13 – Схема прохождения гауссова пучка через тонкослойную диэлектрическую структуру (а), моделирующая призмennую систему ввода излучения в волновод (б) [18, с. 183]

затухает. В условиях возбуждения волноводных мод картина электрического поля в такой структуре имеет вид, представленный на рисунке 14**.

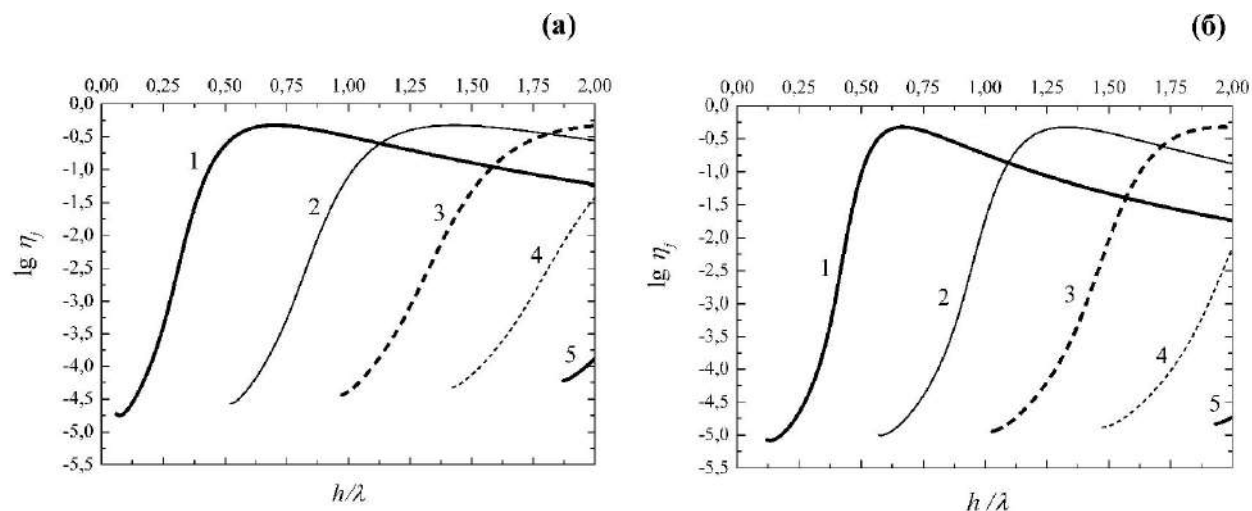


В зазоре, пленке и подложке (при $x > 0$) масштаб по нормали в $w_0 \times 10 / \lambda = 20.000$ раз больше масштаба в призме (при $x < 0$)

Рисунок 14 – Пространственное распределение амплитуд поля в четырехслойной диэлектрической структуре (рисунок 13) при точном выполнении условий возбуждения первой (а) и второй (б) волноводных TE -мод в тонкой диэлектрической пленке [18, с. 186; 28]

** Для наглядности на рисунках 14а и 14б масштаб по нормальной оси x сделан неодинаковым в разных средах, на границах которых амплитудные кривые выделены жирными линиями. В первой среде (призма) он в $w_0 \cdot 10 / \lambda$ раз уменьшен по сравнению с масштабом в остальных средах.

Оказалось, что условие совпадения параметра тангенциального распространения пучка с параметром распространения волноводной моды является необходимым, но не достаточным условием такого возбуждения. Его эффективность может сильно меняться в зависимости от толщины волноведущего слоя, величины его смещения от основания призмы и ширины гауссова пучка [11, с. 1577, 1578]. Для достижения высокой интенсивности волноводного поля нужно выдерживать определенное соотношение между этими параметрами, и оптимальным оказывается выбор толщины волноведущего слоя примерно равным длине волны (рисунок 15). Тогда без учета



Номер кривой соответствует номеру волноводной моды при точном выполнении условий ее возбуждения по углу падения пучка

Рисунок 15 – Зависимость эффективности возбуждения различных волноводных мод диэлектрического слоя для H -поляризации (а) и E -поляризации (б) поля в схеме нарушенного полного внутреннего отражения с призмой, которая помещена на расстоянии $H = 0,5\lambda$ от слоя [11, с. 1577]

рассеяния излучения на ребрах призмы эффективность возбуждения может достигать максимально возможных значений порядка 0,48, как для H -, так и для E -поляризации светового поля (в оптике их обычно обозначают как TE и TM). Но для этого необходимо установить определенную величину зазора между слоем и основанием призмы (тоже порядка длины волны) в зависимости от ширины возбуждающего пучка: чем больше ширина, тем больше зазор. Предпочтительнее использовать пучки с большой полушириной порядка 10^4 – $10^5\lambda$, потому что для них оптимальной будет сравнительно большая толщина зазора между слоем и призмой, а это обеспечивает уменьшение физического рассогласования между схемой с призмой и свободным волноводом за пределами призмы, а также уменьшение потерь энергии волноводной моды после выхода из-под призмы. К тому же малость величины физического рассогласования отвечает слабому затуханию волноводной моды под призмой в

направлении распространения. И хотя увеличение зазора, в котором поле затухает, неизбежно ведет к уменьшению амплитуды поля в пленке, но этот эффект компенсируется увеличенной шириной падающего пучка [11, с. 1580].

В **приложении А** для справки приводятся необходимые формулы, которые описывают прохождение плоских волн через многослойные диэлектрики с разным числом слоев. Они выражаются не через углы падения и преломления, как обычно, а через параметры распространения падающих волн, которые могут быть комплексными. Это дает возможность применять данные формулы при любых углах падения, в том числе при полном внутреннем отражении. В **приложении Б** приводятся результаты вычисления некоторых сингулярных интегралов, которые используются в работе. В **приложении В** приводится акт о практическом использовании результатов работы в образовательном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Получено строгое решение задачи дифракции плоской волны на щели в плоском идеально проводящем экране бесконечно малой толщины и на сопряженной полосе. Ранее для этого применялся метод комбинирования двух независимых решений Зоммерфельда для двух разных краев щели или полосы, но таким путем удавалось получить только приближенные решения дифракционной задачи. Установлено, что строгое решение не сводится к комбинации решений для полуплоскостей, а определяется из условия пространственной ограниченности области существования поля на щели или тока на полосе, откуда следует представление этого поля в виде суммы дискретного ряда Фурье [5, 12, 21].

2. Предложен новый метод асимптотической оценки поведения дифракционного поля вблизи краев щели или полосы, который использует асимптотику коэффициентов ряда Фурье (амплитуд мод щели) высокого порядка, стремящегося к бесконечности. Установлено, что асимптотика поля носит степенной характер с показателями степени по величине меньшими единицы, как и в случае полуплоскости, однако здесь она характеризуется показателями 0,61 и $-0,39$ для компонент электрического поля H - и E -поляризаций, тогда как у полуплоскости эти показатели равны 0,5 и $-0,5$ соответственно. В результате проведенной оценки также установлено, что характер поведения поля вблизи краев определяется модами высшего порядка, тогда как моды низкого порядка с малой пространственной частотой (с небольшим номером n в (2)) формируют характер поля на сравнительно больших расстояниях от каждого края, т.е. вблизи середины щели. Показано, что при решении задач дифракции на микрощелях (полосах) шириной порядка длины волны и менее нужно учитывать большое число мод высокого порядка, и чем меньше ширина щели, тем большее число мод надо принимать во внимание (обычно не менее одной-двух сотен) [6, 21].

3. Построено строгое решение для дифракционной системы с проводящей полосой и плоским диэлектрическим слоем за ней. Особенность подобных задач заключается в том, что с появлением диэлектрика дифракционные интегралы расчета полей становятся сингулярными. У них появляются полюсы, которые физически соответствуют волноводным модам, возбуждаемым в плоском слое как в диэлектрическом волноводе. В настоящей работе для вычисления таких интегралов развит метод аддитивной регуляризации, который позволяет выделить сингулярности в виде отдельно вычисляемых интегралов и привести исходные дифракционные интегралы к виду, допускающему их вычисление стандартными численными методами.

Разработанный метод дает возможность не только рассчитывать полное дифракционное поле, но и определять амплитуды отдельных волноводных мод в диэлектрическом слое [7, 10, 29].

4. Известное приближенное решение задачи дифракции на щели в толстом проводящем экране преобразовано в строгое решение для экранов произвольной толщины путем применения процедуры тихоновской регуляризации к основной системе уравнений для амплитуд щелевых мод. Ранее это приближенное решение давало устойчивый алгоритм расчета только в случае проводящих экранов большой толщины в сравнении с длиной волны излучения. Представлено обобщение полученного строгого решения на случай появления за щелью тонкого диэлектрического слоя на подложке, который может играть роль объекта воздействия электромагнитного излучения (слоя фоторезиста в оптической литографии, исследуемого вещества в спектроскопии и т. п.). Наличие диэлектрика влияет на пространственную картину дифракционного поля, и такое влияние особенно заметно для малых дифракционных систем, когда размер щели, толщина диэлектрика и величина зазора между ним и экраном оказываются одного порядка с длиной волны излучения и менее [2, 3, 9, 10, 12, 22].

5. Получено строгое решение задачи дифракции плоской волны на двух щелевых отверстиях в идеально проводящем экране произвольной толщины в присутствии плоского диэлектрического слоя за экраном. Показано, что взаимное влияние щелей заметно только на малом расстоянии от экрана (порядка $0,1-0,3\lambda$) в области между щелями, а в остальном пространстве полное дифракционное поле с высокой степенью точности можно рассматривать как простую суперпозицию независимых полей дифракции от каждой щели по отдельности [15].

6. Построено строгое решение задачи дифракции нормально падающей плоской волны на круговом отверстии в идеально проводящем экране произвольной толщины в присутствии и в отсутствие плоского диэлектрического слоя за экраном. До настоящего времени задачи волновой дифракции на круговых отверстиях решались численными методами с применением функции Грина [17].

7. Полученные строгие решения задач дифракции на отверстиях прямоугольной щелевой и круговой геометрии позволили детально исследовать структуру поля при возникновении эффектов аномально высокой интенсивности проходящего пучка и безлинзовой фокусировки излучения микроотверстиями в ближней зоне. На их основе построена теоретическая модель, которая определяет условия появления данных эффектов в зависимости от величины физических параметров задачи. Прежние приближенные теоретические модели давали возможность оценивать только полную

интенсивность проходящего через отверстие излучения без его детальной локализации в ближней зоне. Показано, что эффект безлинзовой фокусировки может иметь место для волн с электрическим вектором, параллельным ребрам щели, и наблюдается при ее ширине (диаметре отверстия) не менее двух длин волн, причем величина эффекта демонстрирует высокую чувствительность к изменениям размеров отверстия и толщины экрана. Установлено, что эффект проявляется сильнее у щелевого отверстия, тогда как для кругового отверстия при прочих равных условиях должно наблюдаться более высокое значение локальной интенсивности в максимуме [9, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 25].

8. Показано, что пространственная структура поля преломления гауссова пучка в условиях скользящего преломления на границе двух однородных изотропных прозрачных сред существенно отличается от структуры поля пучка в режимах обычного распространения и полного внутреннего отражения. Во-первых, такое поле в преломляющей среде является одновременно распространяющимся и затухающим от границы. Во-вторых, даже на очень малых расстояниях, прямо у самой границы оно демонстрирует свойства, характерные для обычных пучков только на больших дистанциях распространения. Это дифракционное уширение, не связанное с возможным дифракционным уширением падающего гауссова пучка, и нелинейная зависимость фазы поля от координат, тоже никак не связанная с искривлением фазового фронта исходного пучка. Показано, что траектория смещения максимума амплитуды поля по глубине преломляющей среды имеет криволинейный вид и характеризуется неэкспоненциальным характером затухания. Все эти особенности пространственной структуры преломленного поля при скользящем преломлении не характерны для обычных прозрачных однородных сред и более соответствуют сильнопоглощающим металлам и неоднородным материалам [4, 14, 27].

9. Представлено обобщение стандартной модели гауссова светового пучка, которое позволяет учитывать наличие поглощения в среде и описывать аномальные режимы преломления светового поля (волноводное возбуждение, полное внутреннее отражение) при условии малости длины волны в сравнении с эффективной шириной пучка. Для частного случая скользящего преломления, когда угол падения пучка на границу раздела сред равен критическому и комплексная амплитуда преломленного поля проявляет неэкспоненциальные зависимости от пространственных координат, также предложена приближенная экспоненциальная модель описания поля, которая в общем и целом характеризует особенности его пространственной структуры при полном внутреннем отражении. Объединение двух этих моделей в одну общую аналитическую теорию преломления гауссова пучка на границах разных сред позволило единым образом описывать пространственную структуру светового

пучка при прохождении через многослойные диэлектрические структуры при любых углах падения, когда в разных слоях проявляются различные эффекты прохождения: свободное распространение, скользящее преломление, полное внутреннее отражение и волноводное возбуждение. До настоящего времени подобная приближенная аналитическая модель отсутствовала, а расчеты полей в многослойных диэлектрических системах проводились либо с помощью плосковолнового приближения, либо с применением численного метода конечных разностей или конечных элементов. Условием применимости представленной модели является малость длины волны излучения и толщины каждого из диэлектрических слоев по сравнению с шириной пучка [1, 16, 18, 26, 27].

10. В качестве частного случая применения общей теории рассмотрен конкретный пример призмной схемы возбуждения волноводных мод в условиях нарушенного полного внутреннего отражения, что позволило установить новые закономерности явления волноводного возбуждения. Выяснилось, что условие совпадения параметра тангенциального распространения пучка с параметром распространения волноводной моды является необходимым, но не достаточным условием такого возбуждения. Показано, что его эффективность может сильно меняться в зависимости от толщины волноводного слоя, величины его смещения от основания призмы и ширины гауссова пучка. Установлено, что для достижения высокой интенсивности волноводного поля нужно выдерживать определенное соотношение между этими параметрами, и оптимальным является выбор толщины волноводного слоя примерно равным длине волны (рисунок 15). Тогда без учета рассеяния излучения на ребрах призмы эффективность возбуждения может достигать значений порядка 0,48, как для TE -, так и для TM -поляризации светового поля. Но для этого необходимо устанавливать определенную величину смещения слоя от основания призмы (тоже порядка длины волны) в зависимости от ширины возбуждающего пучка: чем больше эта ширина, тем больше должно быть смещение [8, 11, 16, 18, 24, 27, 28].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты настоящей работы относятся к теории дифракции и распространения электромагнитных волн и пригодны для описания процессов прохождения световых пучков через многослойные диэлектрические структуры и отверстия в непрозрачных экранах. Представленные в работе новые методы решения дифракционных задач и полученные с их помощью строгие решения задач дифракции на щелевых и круговых отверстиях существенно расширяют возможности теории дифракции и распространения электромагнитных волн и могут быть использованы в качестве базовой основы приближенных моделей

расчета дифракционных полей на сложных рассеивающих структурах с такими отверстиями. Полезным вкладом в общую теорию также является развитый метод аддитивной регуляризации, который позволяет учесть присутствие плоскостойких диэлектрических структур в составе дифракционных систем с проводящими экранами, что значительно расширяет круг задач, поддающихся строгому решению.

Конкретные результаты данной работы могут применяться при планировании и анализе экспериментов с микроотверстиями в ближней зоне, например, в локальной спектроскопии тонких слоев и малых объемов, а также в оптической литографии, где экран с апертурой служит моделью фотошаблона, а плоский диэлектрик – слоя фоторезиста на подложке. Строгие модели дифракции на отверстиях в непрозрачных экранах могут использоваться для определения оптимальных режимов работы апертурно ограниченных дифракционных структур как микро- и наноантенн, фокусирующих электромагнитное излучение в малой области пространства.

Еще одна область применения результатов работы – моделирование электромагнитных датчиков физических параметров диэлектрических материалов, например, влагосодержания бумаги или зерна, в которых резонаторная область возбуждения поля контактирует с тестируемым материалом посредством щелевых отверстий.

Предложенный в работе метод описания прохождения гауссова пучка через плоские многослойные диэлектрики может использоваться для расчета полей в спектроскопии полного внутреннего отражения и нарушенного полного внутреннего отражения, а также в интегральной оптике при моделировании явления возбуждения планарных волноводов призмным методом. В отличие от существующих моделей, он позволяет реально моделировать крупномасштабную пространственную структуру преломленного поля при полном внутреннем отражении световых пучков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень изданий ВАК, и в иностранных научных изданиях

1. Кухарчик, П. Д. Полное внутреннее отражение гауссова светового пучка / П. Д. Кухарчик, В. М. Сердюк, И. А. Титовицкий // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 4. – С. 74–78.
2. Сердюк, В. М. Дифракция плоской электромагнитной волны на щели в проводящем экране произвольной толщины / В. М. Сердюк // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, вып. 8. – С. 113–120.
3. Rudnitsky, A. S. Diffraction of a plane electromagnetic wave by a slot in a conducting screen of finite thickness placed in front of a half-infinite dielectric / A. S. Rudnitsky, V. M. Serdyuk // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. PIER 86. – P. 277–290.
4. Serdyuk, V. M. A simple analytic approximation for the refracted field at Gaussian beam incidence upon a boundary of absorbing medium / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky // Journ. of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2010. – Vol. 2. No. 11. – P. 640–648.
5. Serdyuk, V. M. Exact solutions for electromagnetic wave diffraction by a slot and strip / V. M. Serdyuk // AEÜ – International Journal of Electronics and Communications. – 2011. – Vol. 65, Issue 3. – P. 182–189.
6. Serdyuk, V. M. Diffraction field behavior near the edges of a slot and strip / V. M. Serdyuk // Progress In Electromagnetics Research M. – 2011. – Vol. 20. – P. 207–218.
7. Serdyuk, V. M. A rigorous theoretical model of guided waves excitation in a plane dielectric layer under electromagnetic diffraction by a conducting strip / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky // Optics & Laser Technology. – 2014. – Vol. 58. – P. 43–51.
8. Serdyuk, V. M. An approximate analytical solution for waveguide excitation of a plane dielectric layer by a Gaussian beam at frustrated total internal reflection / V. M. Serdyuk, A. S. Rudnitsky // Journ. Opt. Soc. Amer. A. – 2015. – Vol. 32, No. 5. – P. 843–851.
9. Serdyuk, V. M. Spatial structure of electromagnetic field diffracted by a sub-wavelength slot in a thick conducting screen / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky, S. V. von Gratoski, V. V. Koledov // Progress In Electromagnetics Research M. – 2018. – Vol. 69. – P. 15–22.
10. Serdyuk, V. M. Method of additive regularization of field integrals in the problem of electromagnetic diffraction by a slot in a conducting screen, placed before a dielectric layer / V. M. Serdyuk // Progress In Electromagnetics Research B. – 2019. – Vol. 83. – P. 129–151.

11. Serdyuk, V. M. Efficiency of Gaussian light beam transformation into a waveguide mode of a plane dielectric layer under frustrated total internal reflection / V. M. Serdyuk, A. S. Rudnitsky // *Journ. Opt. Soc. Amer. A.* – 2019. – Vol. 36, No. 9. – P. 1573–1582.
12. Сердюк, В. М. Методы теории дифракции в микроволновой влагометрии бумажных материалов / В. М. Сердюк, И. А. Титовицкий // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* – 2020. № 3. – С. 32–45.
13. Serdyuk, V. M. Theoretical investigation of electromagnetic diffraction focusing in the near zone of a sub-wavelength aperture / V. M. Serdyuk // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications.* – 2022. – Vol. 50. – Article 101017.
14. Serdyuk, V. M. Spatial structure of the refracted field of a Gaussian light beam at total internal reflection / V. M. Serdyuk // *Journ. Opt. Soc. Amer. A* – 2022. – Vol. 39, Issue 11. – P. 2083–2089.
15. Serdyuk, V. M. Theoretical study of electromagnetic field, diffracted by two slots in a conducting screen / V. M. Serdyuk // *Progress In Electromagnetics Research B.* – 2023. – Vol. 98. – P. 77–86
16. Serdyuk, V. M. Approximate analytical model of the refracted field of the Gaussian light beam on a plane dielectric interface / V. M. Serdyuk // *Optics Communications.* – 2023. – Vol. 535. – Article 129310.
17. Serdyuk, V. M. Diffraction of a plane electromagnetic wave by a circular aperture in a conducting screen of finite thickness/ V. M. Serdyuk // *Progress In Electromagnetics Research B.* – 2023. – Vol. 102. – P. 99–114.
18. Serdyuk, V. M. Spatial structure of light fields at Gaussian beams transmission through multilayer dielectrics under the total internal reflection and waveguide excitation / V. M. Serdyuk // *Journ. Opt. Soc. Amer. B* – 2025. – Vol. 42, Issue 1. – P. 180–188.

Статьи в других научных изданиях

19. Serdyuk, V. M. Calculation of near zone electromagnetic field radiated from sub-wavelength nanoaperture to a plane dielectric / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky, S. V. Von Gratoski, V. V. Koledov // *International Journal of Nanoscience.* – 2019. – Vol. 18, No. 3 & 4. Article 1940024. – P. 1–4.
20. Serdyuk, V. M. Diffraction focusing of electromagnetic radiation by transmission through sub-wavelength nanoapertures / V. M. Serdyuk, S. V. Von Gratoski, V. V. Koledov // *Semiconductors.* – 2020. – Vol. 54, No. 14. – P. 1814–1815.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

21. Serdyuk, V. M. Rigorous methods for solving the problems of electromagnetic diffraction by slot obstacles / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky // Proceedings of the 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Kharkiv, Ukraine, August 28-30, 2012 – Kharkiv: IEEE, 2012. – P. 134–137.

22. Serdyuk, V. M. Spatial structure of near zone electromagnetic fields, radiated by nanoantennae with sub-wavelength apertures / V. M. Serdyuk, J. A. Titovitsky, S. V. von Gratoski, V. V. Koledov // Nanostructures: Physics and Technology. 26th International Symposium. Proceedings – St. Petersburg: Academic University Publ., 2018. – P. 101–102.

23. Serdyuk, V. M. Diffraction focusing of electromagnetic radiation by transmission through sub-wavelength nanoapertures / V. M. Serdyuk, S. V. von Gratoski, V. V. Koledov // Nanostructures: Physics and Technology. 28th Int. Symposium. Proceedings – St. Petersburg: Ioffe Institute RAS, 2020. – P. 23–24.

24. Сердюк, В. М. Эффективность преобразования гауссова светового пучка в волноводные моды плоского диэлектрического слоя в условиях нарушенного полного внутреннего отражения / В. М. Сердюк, А. С. Рудницкий // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: Материалы 6-й Международной научно-практич. конференции (Минск, 20 – 21 мая 2021 г.) – Минск: НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ, 2021. – С. 77–79.

25. Сердюк, В. М. Дифракционная фокусировка светового излучения при прохождении через субволновые наноапертуры / В. М. Сердюк, С. В. Гратовски, В. В. Коледов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: Материалы 6-й Международной научно-практич. конференции (Минск, 20 – 21 мая 2021 г.) – Минск: НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ, 2021. – С. 80–82.

26. Сердюк, В. М. Теоретическая модель пространственной структуры светового пучка при различных режимах преломления / В. М. Сердюк // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: Материалы 7-й Международной научно-практич. конференции 18–19 мая 2023 г. – Минск: НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ, 2023. – С. 84–86.

27. Сердюк, В. М. Пространственная структура преломленного поля гауссова светового пучка при полном внутреннем отражении [Электронный ресурс] / В. М. Сердюк // Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. научн.-технич. конф., Минск, 21 – 24 ноября 2023 г. – Минск: БГУ, 2023. – С.

32–36. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/305156>. – Дата доступа: 15.11.2023.

28. Сердюк, В. М. Пространственная структура поля преломления гауссова светового пучка в многослойных диэлектриках при различных режимах распространения [Электронный ресурс] / В. М. Сердюк // Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. научн.-технич. конф., Минск, 21 – 24 ноября 2023 г. – Минск: БГУ, 2023. – С. 37–41. – Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/305156>. – Дата доступа: 15.11.2023.

Тезисы докладов

29. Сердюк, В. М. Строгая теоретическая модель дифракционного возбуждения плоского диэлектрического волновода / В. М. Сердюк, И. А. Титовицкий // Квантовая электроника: материалы IX Междунар. научно-технич. конф., Минск, 18–21 ноября 2013 г. – Минск: изд. центр БГУ, 2013. – С. 26–27.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'V. M. Serdyuk'.

РЕЗЮМЕ

Сердюк Владимир Михайлович

Теория электромагнитной дифракции на отверстиях в проводящих экранах и в плоскостойких диэлектрических структурах

Ключевые слова: теория дифракции, ближняя зона, щель и круговое отверстие, безлинзовая дифракционная фокусировка, гауссов пучок, полное внутреннее отражение, нарушенное полное внутреннее отражение.

Целями работы являются теоретическое описание и исследование пространственной структуры электромагнитных полей оптического и радиодиапазонов при дифракционном прохождении через отверстия в проводящих экранах и плоские диэлектрики за ними, а также при преломлении световых пучков в плоскостойких диэлектрических структурах.

Методы исследования: методы строгой теории дифракции, основанные на применении метода частичных областей для решения уравнений Максвелла, а также методы точного и асимптотического вычисления интегралов Фурье для полей световых пучков.

Полученные результаты и их новизна. Получено строгое решение задачи дифракции плоской волны на щели в бесконечно тонком идеально проводящем экране и на сопряженной полосе. Построены строгие решения задач дифракции волн на щели и круговом отверстии в проводящих экранах произвольной толщины. Представлен метод аддитивной регуляризации для вычисления дифракционных интегралов при наличии плоскостойких диэлектриков за дифракционными препятствиями. Предложена теоретическая модель эффекта безлинзовой дифракционной фокусировки микроотверстиями в ближней зоне. Теоретически исследована пространственная структура поля преломления гауссова пучка при полном внутреннем отражении, предсказаны эффекты аномально высокой расходимости преломленного поля и неэкспоненциального характера его затухания. Предложена приближенная аналитическая модель описания поля прохождения гауссова пучка через плоскостойкие диэлектрические структуры в условиях полного внутреннего отражения и волноводного возбуждения в отдельных слоях.

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты работы рекомендуется использовать при моделировании дифракционных процессов распространения излучения в оптике поперечно ограниченных систем, локальной спектроскопии микроразмерных объектов, оптической литографии, а также в спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения.

РЭЗІЮМЭ

Сярдзюк Уладзімір Міхайлавіч

Тэорыя электрамагнітнай дыфракцыі на адтулінах ў праводзячых экранах і ў плоскаслаістых дыэлектрычных структурах

Ключавыя словы: тэорыя дыфракцыі; блізкая зона; шчыліна і кругавая адтуліна; безлінзавая дыфракцыйная факусоўка; гаўсаў пучок; поўны ўнутрані адбітак; парушаны поўны ўнутрані адбітак.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка метадаў апісання і тэарэтычнае даследаванне прасторавай структуры электрамагнітных палёў аптычнага, мікрахвалевага і радыа дыяпазонаў, якія ўзнікаюць у плоскаслаістых дыэлектрыках з прычыны дыфракцыі хваль на блізкаразмешчаных мікраадтулінах у плоскіх праводзячых экранах альбо ў выніку праламлення папярочна абмежаваных светлавых пучкоў гаўсавага профіля.

Метады даследавання: метады строгай тэорыі дыфракцыі, заснаваныя на прымяненні метаду частковых абласцей для вырашэння ураўненняў Максвела; метады дакладнага і асімптатычнага вылічэнні інтэгралаў Фур'е для палёў светлавых пучкоў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Атрымана строгае рашэнне задачы дыфракцыі плоскай хвалі на шчыліны ў бясконца тонкім ідэальна праводзячым экране і на спалучанай паласе. Пабудаваны строгія рашэнні задач дыфракцыі хваль на шчыліны і кругавой адтуліне ў праводзячых экранах адвольнай таўшчыні. Прадстаўлены метады адытыўнай рэгулярызацыі для вылічэння дыфракцыйных інтэгралаў пры наяўнасці плоскаслаістых дыэлектрыкаў з дыфракцыйнымі перашкодамі. Прапанавана тэарэтычная мадэль ефекту безлінзавай дыфракцыйнай факусоўкі мікраадтулінамі ў блізкай зоне. Тэарэтычна даследавана прасторавая структура поля праламлення гаўсавага пучка пры поўным унутраным адбітку, прадказаны эфекты анамальна высокай разбежнасці праламленага поля і неэкспанентнага характару яго згасання. Прапанавана набліжаная аналітычная мадэль апісання поля праходжання гаўсавага пучка праз плоскаслаістай дыэлектрычныя структуры ва ўмовах поўнага ўнутранага адбітку і хваляводнага ўзбуджэння ў асобных пластах.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення. Вынікі працы рэкамендуецца выкарыстоўваць пры мадэляванні дыфракцыйных працэсаў распаўсюджвання выпраменьвання ў оптыцы папярочна абмежаваных сістэм, лакальнай спектраскапіі мікразмерных аб'ектаў, аптычнай літаграфіі, а таксама ў спектраскапіі парушанага поўнага ўнутранага адлюстравання.

SUMMARY

Serdyuk Vladimir Mikhailovich

Theory of electromagnetic diffraction by apertures in conducting screens and in plane layered dielectric structures

Key words: diffraction theory; near zone; slot and circular apertures; lensless diffraction focusing; Gaussian beam; total internal reflection; frustrated total internal reflection.

The aim of the work is to develop methods for describing and theoretical studying the spatial structure of electromagnetic fields of the optical, microwave and radio range, those arise in plane-layered dielectrics due to the diffraction of waves on closely spaced microholes in plane conducting screens or as a result of the refraction of transversely limited light beams of the Gaussian profile.

Research methods: methods of the rigorous theory of diffraction, based on the use of the eigenmode technique for solving Maxwell's equations, methods of exact and asymptotic calculation of Fourier integrals for the fields of light beams.

Obtained results and their novelty. A rigorous solution to the problem of plane wave diffraction by a slot in an infinitely thin perfectly conducting screen and by a conjugate strip is obtained. Rigorous solutions are constructed for the problems of wave diffraction by a slot and a circular aperture in conducting screens of arbitrary thickness. The method of additive regularization is presented for calculation diffraction integrals in the presence of plane-layered dielectrics behind diffraction obstacles. A theoretical model is proposed for the effect of lensless diffraction focusing by microholes in the near field. The spatial structure of the refractive field of a Gaussian beam under total internal reflection is theoretically investigated, the effects of anomalously high divergence of the refracted field and the non-exponential nature of its decay are predicted. An approximate analytical model is proposed for describing the field of transmission of a Gaussian beam through plane-layered dielectric structures under conditions of total internal reflection and waveguide excitation in individual layers.

Recommendations for use and application. The results of the work The results of the work are recommended for use in modeling diffraction processes of radiation propagation in optics of transversely bounded systems, local spectroscopy of micro-sized objects, optical lithography, as well as in spectroscopy of frustrated total internal reflection.

СЕРДЮК Владимир Михайлович

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИФРАКЦИИ
НА ОТВЕРСТИЯХ В ПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНАХ
И В ПЛОСКОСЛОИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Подписано в печать « 14 » 09 2026. Формат 60 × 90 1/16

Бумага – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,39

Учетн. изд. л. 0,8 Тираж 60 экз. Заказ № 4

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. Степанова НАН Беларуси
220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.
Отпечатано на ризографе Института физики имени Б.И. Степанова
НАН Беларуси