

Безус Евгений Анатольевич

**Расчет резонансных дифракционных
оптических структур, реализующих преобразование
волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн**

1.3.6 — Оптика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технической кибернетики.

Научный консультант:

Досколович Леонид Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор РАН.

Официальные оппоненты:

Осипов Олег Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой высшей математики;

Петров Николай Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории акустооптики;

Тимофеев Иван Владимирович, доктор физико-математических наук, Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, заместитель директора по научной работе.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Защита состоится 11 декабря 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на официальном сайте по электронному адресу: https://ssau.ru/resources/dis_protection/bezus.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.379.01,
к.ф.-м.н., доцент

А. М. Телегин

Общая характеристика работы

В диссертации исследуются оптические эффекты, возникающие при дифракции волноводных мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов и поверхностных электромагнитных волн (блоховских поверхностных волн и поверхностных плазмон-поляритонов) на резонансных дифракционных структурах, расположенных на поверхности волновода или на границе раздела, вдоль которой распространяется поверхностная волна.

Актуальность темы и степень ее разработанности

В течение двух последних десятилетий эффекты взаимодействия световых волн с резонансными дифракционными структурами (в т. ч. дифракционными решетками, микро- и нанорезонаторами, метаповерхностями, слоистыми и фотонно-кристаллическими структурами) являются предметом интенсивных исследований, о чем, в частности, свидетельствует большое число обзорных статей по данной тематике, выходящих в ведущих мировых научных журналах (Limonov et al., 2017; Baranov et al., 2017; Quaranta et al., 2018; Qiao et al., 2018; Krasnok et al., 2019; Koshelev et al., 2019; Sadreev, 2021; Yao et al., 2023; Yu et al., 2025).

Одним из наиболее хорошо исследованных типов резонансных структур являются дифракционные решетки, представляющие собой периодически структурированные слои диэлектрика или металла. Несмотря на то, что изучение резонансных оптических свойств дифракционных решеток имеет долгую историю (Wood, 1902; Hessel and Oliner, 1965; Petit, 1980), теоретические и экспериментальные исследования в области механизмов формирования и взаимодействия резонансов в дифракционных решетках по-прежнему являются высоко актуальными (Collin, 2014; Quaranta et al., 2018; Qiao et al., 2018; Xie et al., 2026). Это связано с тем, что в решетках существует широкий спектр резонансных оптических эффектов, включающих экстраординарное оптическое пропускание, полное поглощение падающего излучения, связанные состояния в континууме, формирование широких зон спектра с фактически полным отражением или пропусканием, формирование узких зон (пиков) отражения или пропускания на близком к нулю фоне, большое локальное усиление интенсивности электромагнитного поля за счет возбуждения высоккодобротных мод. Указанные эффекты наблюдаются, когда период дифракционной решетки близок к длине волны и перспективны, в частности, для реализации операций частотной и пространственной оптической фильтрации (Wang and Magnusson, 1993; Ko and Magnusson, 2016), а также для выполнения заданных пространственно-временных преобразований оптических сигналов. Последнее позволяет эффективно применять дифракционные решетки в задачах аналоговых оптических вычислений для оптического дифференцирования и интегрирования профилей падающих пространственных, временных или пространственно-временных оптических сигналов. Следует отметить, что направление, связанное с оптической реализацией вычисления различных дифференциальных и интегральных операторов привлекает в настоящее время большой интерес исследователей (Silva et al., 2014; Pors et al., 2015; Zhu et al., 2017; Zhou et al., 2020; Badloe et al., 2022; Wang et al., 2024; Zhou et al., 2025). Кроме того, дифракционные решетки являются базовым элементом

широкого класса оптических устройств, включающих антиотражающие покрытия, датчики параметров среды, анализаторы спектра, поляризаторы, делители пучка, устройства ввода-вывода оптического излучения в волноводы и др. (Chang-Hasnain and Wang, 2012; Collin, 2014; Quaranta et al., 2018; Qiao et al., 2018).

Наряду с дифракционными решетками представляет большой интерес исследование резонансных оптических свойств слоистых структур, состоящих из наборов плоскопараллельных диэлектрических и (или) металлических слоев (Sainidou et al., 2010; Cui et al., 2014; Zhu et al., 2017; Ng et al., 2019; Wang et al., 2023; Dias and van de Groep, 2024). Среди таких структур следует выделить брэгговские решетки с дефектным слоем (БРДС), состоящие из двух симметричных брэгговских решеток, разделенных нарушающим периодичность слоем, слоистые структуры «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структуры), в простейшем случае состоящие из пары металлических слоев, разделенных слоем диэлектрика, и т. н. W-структуры, состоящие из центрального слоя с высоким показателем преломления, находящегося между двумя симметрично расположенными слоями с меньшим показателем преломления, которые, в свою очередь, окружены обкладками с высоким показателем преломления. В таких структурах в резонансных условиях возникают пики пропускания (в БРДС и W-структурах) или поглощения (в МДМ-структурах) и минимумы отражения, что позволяет также использовать их для оптической фильтрации и аналоговых оптических вычислений.

Важно отметить, что обсужденные выше резонансные дифракционные решетки и слоистые структуры ориентированы на работу с излучением, распространяющимся в свободном пространстве. Вместе с тем, развитие интегральной оптики и фотоники (Thylen and Wosinski, 2014; Cheben et al., 2018; Xiang et al., 2022; Xiao et al., 2023; Zhang et al., 2024) делает актуальным исследование интегральных аналогов описанных выше резонансных слоистых структур и дифракционных решеток, ориентированных на работу с модами волноводов, ограниченных по одной координате, или поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), распространяющихся вдоль некоторой поверхности (границы раздела). Такие дифракционные структуры, которые иногда называют элементами «двумерной оптики», могут представлять собой диэлектрический дифракционный микрорельеф на поверхности волновода или на поверхности распространения ПЭВ. При этом, с одной стороны, можно ожидать «переноса» оптических свойств, наблюдаемых для резонансных дифракционных структур, ориентированных на работу с излучением, распространяющимся в свободном пространстве, на интегральную геометрию. С другой стороны, задачи дифракции волноводных мод и ПЭВ на элементах «двумерной оптики» не являются эквивалентными задачам дифракции плоских электромагнитных волн на соответствующих «обычных» дифракционных структурах. Следует, прежде всего, упомянуть связь волноводных мод или ПЭВ различной поляризации на границах раздела, в связи с чем можно ожидать возникновения новых интересных оптических эффектов. Кроме того, необходимо также учитывать «паразитное» рассеяние энергии падающей волны на неоднородностях в области над и под волноводным слоем или поверхностью распространения, которое связано с несовпадением поперечного профиля электромагнитного поля моды или ПЭВ в области оптического элемента и вне его. Данный эффект носит скорее негативный характер и может приводить к уменьшению эффективности дифракционных структур для волноводных мод и ПЭВ (в особенности,

резонансных структур), в связи с чем представляет большой интерес исследование возможности устранения или, хотя бы, уменьшения указанного паразитного рассеяния.

Среди «платформ» двумерной оптики можно выделить три основных, наиболее часто рассматриваемых в существующих работах: платформу волноводных мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов (Lifante, 2003; Hammer et al., 2024), платформу блоховских поверхностных волн (БПВ) — поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела однородного диэлектрика и одномерного фотонного кристалла (Виноградов и др., 2010; Polo and Lakhtakia, 2011; Vosoughi Lahijani et al., 2022; Michelotti, 2025), и платформу поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) — поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела металла и диэлектрика (Barnes et al., 2003; Ozbay, 2006; Lee et al., 2010; Chen et al., 2025; Ichiji et al., 2025). Важно отметить, что, несмотря на то, что для волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн был предложен и исследован ряд элементов «двумерной оптики», включая, в частности, различные фокусирующие структуры (Hohenau et al., 2005; Yu et al., 2014; Kim et al., 2017; Ebers et al., 2020; Riley et al., 2022; Xu et al., 2023), т. н. цифровые планарные голограммы (Calafiore et al., 2014) и дифракционные решетки с большим периодом (Ma et al., 2013; Yu et al., 2015), интегральные аналоги резонансных дифракционных решеток и слоистых структур для указанных платформ (в особенности, с подавлением паразитного рассеяния) или совсем не были исследованы, или были исследованы недостаточно. Из проведенного анализа существующих работ следуют цель и задачи диссертации.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое и численное исследование оптических эффектов, возникающих при дифракции волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн на резонансных дифракционных структурах.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Численно исследовать резонансные оптические свойства дифракционной структуры, являющейся интегральным аналогом слоистой W-структуры и состоящей из двух выемок на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода. Исследовать возможность оптического выполнения структурой операций дифференцирования профиля падающего пространственного, временного или пространственно-временного оптического сигнала, распространяющегося в волноводе.
2. Численно исследовать резонансные оптические свойства дифракционной структуры, являющейся интегральным аналогом слоистой структуры «металл-диэлектрик-металл» и состоящей из двух металлических полос, «погруженных» в плоскопараллельный диэлектрический волновод. Исследовать возможность получения в структуре полного поглощения или когерентного полного поглощения падающего излучения.
3. Численно исследовать и теоретически описать резонансные оптические свойства дифракционных структур, состоящих из одной или нескольких диэлектрических ступенек на поверхности плоскопараллельного волновода. Исследовать возможность оптического выполнения ступенькой операций

интегрирования и дифференцирования профиля падающего пучка, распространяющегося в волноводе.

4. Численно и теоретически исследовать резонансные свойства дифракционных структур, состоящих из диэлектрической ступеньки на торце плоскопараллельного диэлектрического волновода или выемки вблизи торца волновода и работающих в геометрии полного внутреннего отражения. Исследовать возможность использования таких структур в качестве интерферометров Жире–Турнуа для волноводных мод.
5. Численно исследовать оптические свойства дифракционных структур, являющихся интегральным аналогом брэгговских решеток с дефектным слоем для блоховских поверхностных волн и состоящих из набора диэлектрических ступенек с нарушением периодичности на поверхности одномерного фотонного кристалла. Исследовать возможность оптического выполнения с помощью таких структур операции дифференцирования профиля падающего импульса или пучка БПВ.
6. Теоретически и численно исследовать возможность устранения паразитного рассеяния блоховских поверхностных волн при дифракции на интегральных дифракционных решетках на поверхности фотонного кристалла. Исследовать резонансные оптические свойства дифракционных решеток для БПВ, работающих в субволновом режиме и в геометрии Литрова.
7. Теоретически и численно исследовать возможность подавления паразитного рассеяния поверхностных плазмон-поляритонов при дифракции на диэлектрической ступеньке на поверхности металла в широком диапазоне углов падения за счет перехода к двухслойной геометрии ступеньки. Исследовать возможность применения этого подхода для увеличения эффективности массивов линз и брэгговских решеток для ППП.
8. Численно исследовать оптические свойства интегральных дифракционных решеток для ППП, представляющих собой периодические наборы диэлектрических ступенек на поверхности металла с периодом, близким к длине волны. Исследовать возможность использования таких структур в качестве отражателей, делителей и дефлекторов пучка ППП.

Научная новизна работы

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. На основе численного моделирования в рамках строгой электромагнитной теории дифракции показано, что в спектрах отражения и пропускания дифракционной структуры, состоящей из двух выемок на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода, могут возникать высокочастотные резонансы, проявляющиеся в виде нулей отражения и пиков пропускания. Резонансы возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода в случае, когда отсутствует «паразитное» рассеяние и возбуждение ТМ-поляризованных мод. Показано, что структура может быть использована для оптического дифференцирования профиля

падающего пространственного, временного или пространственно-временного оптического сигнала.

2. На основе численного моделирования показано, что в дифракционной структуре, состоящей из двух металлических полос, «погруженных» в плоскопараллельный диэлектрический волновод, возможно получение полного поглощения (при падении одной моды) или когерентного полного поглощения (при симметричном падении двух мод с разных сторон структуры). Указанные эффекты имеют место при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды при отсутствии «паразитного» рассеяния и возбуждения ТМ-поляризованных мод.
3. На основе численного моделирования показано, что в спектрах отражения и пропускания дифракционной структуры в виде диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода могут возникать резонансные особенности в виде нулей пропускания и пиков отражения. Эти особенности возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды в диапазоне углов падения, обеспечивающем отсутствие «паразитного» рассеяния и существование ТМ-поляризованной моды внутри ступеньки. Теоретически и численно показано, что в структуре существуют связанные состояния в континууме. Показано, что структура может быть использована для оптического интегрирования и дифференцирования профиля падающего пучка по пространственной координате. Теоретически и численно показано, что за счет использования структур из нескольких ступенек возможно получение пиков отражения с формой, близкой к прямоугольной.
4. На основе численного моделирования показано, что дифракционные структуры, состоящие из диэлектрической ступеньки на торце плоскопараллельного диэлектрического волновода или выемки вблизи торца волновода, работающие в геометрии полного внутреннего отражения, обеспечивают существенно нелинейную зависимость фазы отраженной моды от оптической длины пути в структуре и могут быть использованы в качестве интерферометров Жире–Турнуа для волноводных мод. Теоретически и численно показано, что в структуре в виде диэлектрической ступеньки на торце волновода существуют резонансы, проявляющиеся в резких изменениях фазы отраженной волны, и связанные состояния в континууме.
5. На основе численного моделирования показано, что дифракционные структуры, являющиеся интегральным аналогом брэгговских решеток с дефектным слоем для блоховских поверхностных волн и представляющие собой набор диэлектрических ступенек с нарушением периодичности на поверхности одномерного фотонного кристалла, имеют близкий к нулю минимум отражения вблизи центра запрещенной зоны, что позволяет использовать их для дифференцирования профиля падающего импульса или пучка БПВ.
6. Теоретически и численно показано, что в интегральных дифракционных решетках для БПВ в виде периодического набора диэлектрических ступенек на поверхности фотонного кристалла возможно полное устранение паразитного рассеяния БПВ в случаях, когда решетки работают в субволновом режиме или

в геометрии Литрова. Теоретически и численно показано, что в этих случаях в интегральных решетках могут существовать высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме. Показано, что субволновые решетки могут быть использованы как узкополосные спектральные или угловые фильтры для БПВ, работающие в отражении, а решетки, работающие в геометрии Литрова — как делители или дефлекторы пучка БПВ, работающие в пропускании.

7. На основе теоретического анализа и численного моделирования показано, что при дифракции поверхностного плазмон-поляритона на диэлектрической ступеньке на поверхности металла паразитное рассеяние ППП может быть уменьшено на порядок в широком диапазоне углов падения за счет использования двухслойной ступеньки, обеспечивающей частичное согласование поперечных профилей ППП вне ступеньки и в ней. Показано, что предложенный подход для подавления паразитного рассеяния позволяет увеличить эффективность массивов рефракционных и дифракционных линз и брэгговских отражающих решеток для ППП на 10–30%.
8. На основе численного моделирования показано, что оптические свойства интегральных дифракционных решеток для ППП в виде периодических наборов диэлектрических ступенек на поверхности металла качественно, а при подавлении паразитного рассеяния и количественно близки к оптическим свойствам неинтегральных дифракционных решеток. Показано, что субволновые решетки для ППП с подавлением рассеяния могут быть использованы в качестве компактных узкополосных или широкополосных отражателей для ППП с отражением порядка 0,85. Показано, что дифракционные решетки для ППП, у которых распространяющимися являются нулевые и -1 -е порядки дифракции, могут быть использованы в качестве делителей и дефлекторов пучка ППП.

Положения, выносимые на защиту:

1. При наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды плоскопараллельного диэлектрического волновода на дифракционную структуру, являющуюся интегральным аналогом слоистой W-структуры и состоящую из двух выемок на поверхности волновода, могут возникать высокодобротные резонансы, проявляющиеся в виде нулей отражения и пиков пропускания с формой, близкой к лоренцевой. Резонансы возникают в случае, когда отсутствует «паразитное» рассеяние из волновода и возбуждение ТМ-поляризованных мод, и связаны с возбуждением вытекающих собственных мод ступеньки, ограниченной выемками. Данная структура позволяет оптически выполнить операцию дифференцирования профиля (огibaющей) падающего пространственного, временного или пространственно-временного оптического сигнала, распространяющегося в волноводе.
2. В дифракционной структуре, являющейся интегральным аналогом слоистой структуры «металл-диэлектрик-металл» и состоящей из двух металлических полос, «погруженных» в плоскопараллельный диэлектрический волновод, возможно получение полного поглощения (при падении одной волноводной моды) или когерентного полного поглощения (при падении двух мод с разных

сторон структуры). Указанные эффекты имеют место при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды при отсутствии «паразитного» рассеяния и возбуждения ТМ-поляризованных мод.

3. В спектрах отражения и пропускания дифракционной структуры в виде диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода могут возникать резонансные особенности в виде нулей пропускания и пиков отражения с формой, близкой к лоренцевой. Данные особенности возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода в диапазоне углов падения, обеспечивающем отсутствие «паразитного» рассеяния и существование ТМ-поляризованной моды внутри ступеньки. В структуре существуют связанные состояния в континууме, положения которых в пространстве параметров описываются разработанной моделью связанных волн. Структура может быть использована для оптического интегрирования в отражении и дифференцирования в пропускании профиля падающего пучка, распространяющегося в волноводе, по пространственной координате. За счет использования «каскадных» структур из нескольких последовательно расположенных ступенек возможно получение резонансных пиков отражения с формой, близкой к прямоугольной.
4. Дифракционные структуры, состоящие из диэлектрической ступеньки на торце плоскопараллельного диэлектрического волновода или выемки вблизи торца волновода, работающие в геометрии полного внутреннего отражения, обеспечивают существенно нелинейную зависимость фазы отраженной моды от оптической длины пути в структуре и могут быть использованы в качестве интерферометров Жире–Турнуа для волноводных мод. В структуре в виде диэлектрической ступеньки на торце волновода существуют «фазовые» резонансы, проявляющиеся в резких изменениях фазы отраженной волны, и связанные состояния в континууме, положения которых в пространстве параметров описываются моделью связанных волн.
5. Дифракционные структуры, являющиеся интегральным аналогом брэгговских решеток с дефектным слоем для блоховских поверхностных волн и представляющие собой набор диэлектрических ступенек с нарушением периодичности на поверхности одномерного фотонного кристалла, имеют близкий к нулю минимум отражения вблизи центра запрещенной зоны. Предложенные структуры могут быть использованы для выполнения дифференцирования по времени или по пространственной координате огибающей падающего импульса БПВ или профиля пучка БПВ.
6. В интегральных дифракционных решетках для БПВ, представляющих собой периодический набор диэлектрических ступенек на поверхности фотонного кристалла, возможно полное устранение паразитного рассеяния БПВ за счет выбора конфигурации запрещенных зон фотонного кристалла и угла падения в случаях, когда решетки работают в субволновом режиме или в геометрии Литрова. В этих случаях в интегральных решетках могут существовать высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме. Положения ССК в пространстве параметров описываются аналитическими выражениями

в рамках модели связанных волн. Резонансные субволновые решетки могут быть использованы как узкополосные спектральные или пространственные (угловые) фильтры для БПВ, работающие в отражении. Решетки, работающие в геометрии Литрова, могут быть использованы как делители или дефлекторы пучка БПВ, работающие в пропускании.

7. При дифракции поверхностного плазмон-поляритона на диэлектрической ступеньке на поверхности металла возможно осуществить уменьшение паразитного рассеяния ППП на порядок в широком диапазоне углов падения ППП за счет перехода к двухслойной геометрии ступеньки, обеспечивающей частичное согласование поперечных профилей ППП вне ступеньки и в ней. Предложенный подход для подавления паразитного рассеяния позволяет увеличить на 10–30% эффективность массивов рефракционных и дифракционных линз и брэгговских отражающих решеток для ППП.
8. Оптические свойства интегральных дифракционных решеток для ППП, представляющих собой периодические наборы диэлектрических ступенек на поверхности металла, качественно, а при подавлении паразитного рассеяния и количественно близки к оптическим свойствам неинтегральных дифракционных решеток. В субволновом режиме такие интегральные структуры с подавлением рассеяния могут быть использованы в качестве узкополосных или широкополосных отражателей для ППП с отражением порядка 0,85, имеющих субволновый размер в направлении, перпендикулярном направлению периодичности. Дифракционные решетки для ППП, у которых распространяющимися являются нулевые и -1 -е порядки дифракции, могут быть использованы в качестве делителей и дефлекторов пучка ППП, работающих в пропускании.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены выражения, подтверждающие существование и описывающие положение в пространстве параметров связанных состояний в континууме в ряде дифракционных структур для мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов и блоховских поверхностных волн: диэлектрических ступенек на поверхности волновода или фотонного кристалла и интегральных дифракционных решеток для БПВ, состоящих из периодического набора ступенек на поверхности фотонного кристалла. Получены условия, при выполнении которых в «каскадных» структурах из нескольких последовательно расположенных диэлектрических ступенек на поверхности волновода возникают резонансные пики отражения с формой, близкой к прямоугольной.

Предложенные и исследованные в работе дифракционные структуры могут найти применение в интегральных оптических схемах на платформах мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов, блоховских поверхностных волн или поверхностных плазмон-поляритонов в качестве спектральных и пространственных фильтров, узкополосных и широкополосных отражателей, делителей и дефлекторов пучка, интерферометров Жире–Турнуа, а также аналоговых оптических дифференциаторов или интеграторов, выполняющих дифференцирование или интегрирование профиля падающего оптического сигнала.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов

В диссертационной работе для теоретического анализа используются методы математического анализа и линейной алгебры. Для моделирования дифракции волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн на рассматриваемых интегральных дифракционных структурах используются метод Фурье-мод численного решения уравнений Максвелла, метод матрицы рассеяния и улучшенный алгоритм матрицы пропускания. Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов строгого численного моделирования в рамках электромагнитной теории дифракции и результатов, полученных с помощью разработанных теоретических моделей. Кроме того, корректность работы разработанной автором программной реализации метода Фурье-мод проверялась на тестовых примерах путем сравнения с результатами, опубликованными в работах других авторов, а также с несколькими независимыми реализациями метода. Работоспособность рассчитанных делителей и дефлекторов пучка для поверхностных плазмон-поляритонов на основе интегральных аналогов дифракционных решеток была подтверждена экспериментально.

Личный вклад автора

В диссертации изложены оригинальные результаты, полученные лично автором, либо при его определяющем участии. Автор самостоятельно проводил численные эксперименты, самостоятельно разрабатывал теоретические модели или непосредственно участвовал в их разработке совместно с соавторами. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным консультантом.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 60 работ, в том числе 3 главы в коллективных монографиях и 38 работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук и (или) индексируемых в международных базах данных Web of Science и (или) Scopus.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: XIII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» («Волны-2011») (Москва, Россия, 23–28 мая 2011 г.); Asia-Pacific conference on fundamental problems of opto- and microelectronics (APCOM-2011) (Moscow–Samara, Russia, July 4–8, 2011); Седьмая международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2011» (Санкт-Петербург, Россия, 17–21 октября 2011 г.); The 12th International Conference on Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (NFO12) (Donostia-San Sebastian, Spain, September 3–7, 2012); The 34th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (Stockholm, Sweden, August 12–15, 2013); XIV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2014») (Москва, Россия, 26–31 мая 2014 г.); The 35th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (Guangzhou, China, August 25–28, 2014); VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2014»

(Санкт-Петербург, Россия, 20–24 октября 2014 г.); The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'16) (Malaga, Spain, July 25–28, 2016); SPIE Optics + Optoelectronics 2017 (Prague, Czech Republic, April 24–27, 2017); International Conference “Days on Diffraction 2018” (Saint Petersburg, Russia, June 4–8, 2018); The 3rd International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (METANANO 2018) (Sochi, Russia, September 17–21, 2018); IV Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018) (Самара, Россия, 24–27 апреля 2018 г.); The 41st Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019) (Rome, Italy, June 17–20, 2019); The 4th International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (METANANO 2019) (Saint Petersburg, Russia, July 15–19, 2019); Workshop on Theoretical and Numerical Tools for Nanophotonics (TNTN 2020) (Berlin, Germany, February 12–14, 2020); VI Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020) (Самара, Россия, 26–29 мая 2020 г.); XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2021») (Москва, Россия, 6–11 июня 2021 г.); V Международная школа молодых ученых «Нелинейная фотоника» (Новосибирск, Россия, 9–13 августа 2021 г.); The 6th International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (METANANO 2021) (Online, September 13–17, 2021); VII Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2021) (Самара, Россия, 20–24 сентября 2021 г.); VIII Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022) (Самара, Россия, 23–27 мая 2022 г.); International conference “Days on Diffraction 2023” (Saint Petersburg, Russia, June 5–9, 2023); IX Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2023) (Самара, Россия, 17–23 апреля 2023 г.); XXXVI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2025») (Москва, Россия, 1–6 июня 2025 г.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 260 страниц, включая 110 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 316 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, приведен обзор существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **первой главе** предложены и теоретически и численно исследованы резонансные дифракционные структуры для волноводных мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов, состоящие из малого числа диэлектрических ступенек или выемок на поверхности волновода.

В разделе 1.1 показано, что в режиме, когда отсутствует «паразитное» рассеяние при дифракции волноводной моды на элементе, в исследуемых структурах существуют высокодобротные резонансы, полное поглощение падающего излучения и связанные состояния в континууме. Паразитное рассеяние в области над и под волноводом отсутствует при углах падения, удовлетворяющих неравенству

$$\theta > \arcsin(\max\{n_{\text{sup}}, n_{\text{sub}}\}/n_{\text{eff,TE}}), \quad (1)$$

где n_{sup} и n_{sub} — показатели преломления областей над и под волноводом, а $n_{\text{eff,TE}}$ — эффективный показатель преломления падающей ТЕ-поляризованной моды. В случае, когда дополнительно к неравенству (1) выполняется неравенство

$$\theta > \arcsin(n_{\text{eff,TM}}/n_{\text{eff,TE}}), \quad (2)$$

также не происходит возбуждения ТМ-поляризованных мод.

В подразделе 1.1.1 предложена и исследована интегральная W-структура, состоящая из двух выемок на поверхности плоскопараллельного волновода (рис. 1(а)). Установлено, что при выполнении неравенства (2) в структуре возникают резонансные особенности с высокой добротностью (пики пропускания и минимумы отражения), связанные с возбуждением собственных мод ступеньки, ограниченной выемками. В этом случае в резонансных условиях пропускание становится единичным, а отражение — нулевым. Добротность резонанса может контролироваться за счет выбора ширины выемок, а его спектральное или угловое положение — за счет выбора ширины центральной ступеньки структуры. На рис. 1(б), (в) показаны характерные зависимости пропускания W-структуры (параметры: «центральная» длина волны в свободном пространстве $\lambda_0 = 630$ нм, диэлектрические проницаемости материалов $\varepsilon_{\text{wg}} = 3,32^2$, $\varepsilon_{\text{sub}} = 1,45^2$, $\varepsilon_{\text{sup}} = 1$, $h_{\text{wg}} = h_{\text{wg,r}} = 100$ нм, $h_{\text{wg,g}} = 50$ нм, $w = 100$ нм) от угла падения и длины волны при двух значениях ширины выемок s : 400 и 600 нм. Распределение поля в структуре с $s = 400$ нм в резонансных условиях показано на рис. 1(г).

В подразделе 1.1.2 показано, что в интегральной МДМ-структуре, состоящей из двух металлических полос, «погруженных» в плоскопараллельный волновод (рис. 2), при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода при выполнении неравенства (2) возможно получение полного поглощения падающей волноводной моды. При этом ширина получаемых пиков поглощения и минимумов отражения может варьироваться за счет изменения ширины центральной диэлектрической части структуры, разделяющей металлические полосы, а также за счет выбора материала металлических полос. Кроме того, показано, что при симметричном падении двух мод с разных сторон МДМ-структуры в ней возможно когерентное полное поглощение. Данный эффект имеет место, когда матрица рассеяния МДМ-структуры становится вырожденной. В работе показано, что для симметричных МДМ-структур ($w_1 = w_2 = w$) это происходит при выполнении условий

$$|r| = |r^2 - t^2|, \quad (3)$$

$$s = \frac{\lambda}{n_{\text{eff,TE}} \cos \theta} \left[\mp \frac{\arg[r(r^2 - t^2)^{-1}]}{2\pi} + m \right], \quad (4)$$

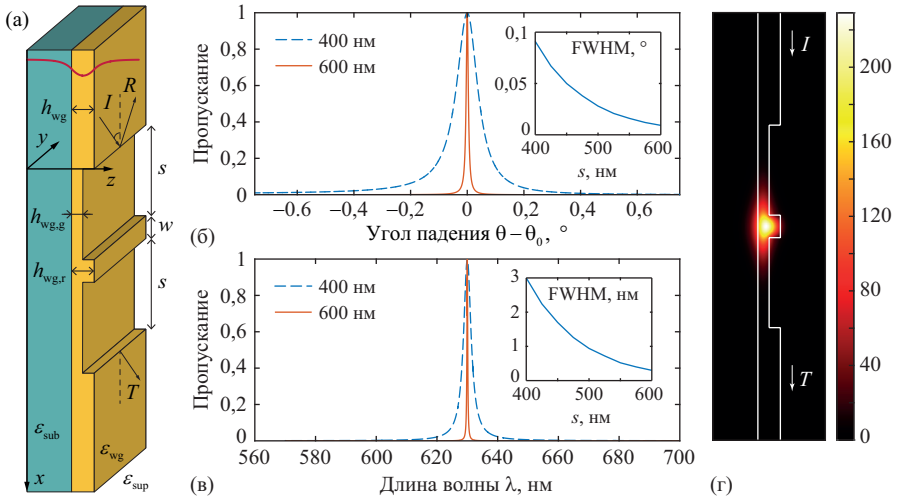


Рисунок 1 — Геометрия интегральной W-структуры из двух выемок на поверхности плоскопараллельного волновода (а) и зависимости от угла падения (б) и длины волны (в) пропускания интегральной W-структуры при $s = 400$ нм (пунктирные кривые) и $s = 600$ нм (сплошные кривые). На вставках показаны зависимости полной ширины по полуспаду (величины FWHM) резонансных пиков от значения s . Распределение компоненты $|H_z|^2$ электромагнитного поля в структуре с $s = 400$ нм в резонансных условиях.

где r и t — комплексные коэффициенты отражения и пропускания металлической полосы шириной w для падающей ТЕ-поляризованной волноводной моды, а m — некоторое целое число, при котором s положительно. Выражение (3) представляет собой уравнение относительно ширины металлической полосы w , решаемое численно, после чего ширина диэлектрической части МДМ-структуры s , разделяющей металлические полосы, может быть рассчитана аналитически из выражения (4). На рис. 2(б) и (в) показаны распределения поля в интегральной МДМ-структуре, в которой возможно когерентное полное поглощение (параметры волновода совпадают с предыдущим примером W-структуры, диэлектрическая проницаемость металлических полос $\epsilon_m = -18,13 + 0,51i$ (серебро), угол падения $\theta = 55^\circ$, значения $w = 34$ нм и $s = 468$ нм удовлетворяют выражениям (3) и (4)): на рис. 2(б) показан случай равных комплексных амплитуд падающих волноводных мод, соответствующий когерентному полному поглощению, а на рис. 2(в) показан случай, при котором когерентного полного поглощения не происходит.

В подразделе 1.1.3 показано, что в спектрах отражения и пропускания структуры, состоящей из диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода (рис. 3(а)), могут возникать резонансные особенности (пики отражения и минимумы пропускания). Резонансные особенности возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода при углах падения, при которых, во-первых, выполняется неравенство (2), и, во-вторых, внутри ступеньки распространяются как ТЕ-, так и кросс-поляризованные (ТМ-поляризованные) моды. В резонансных условиях отражение становится единичным, а пропускание — нулевым. Добротность

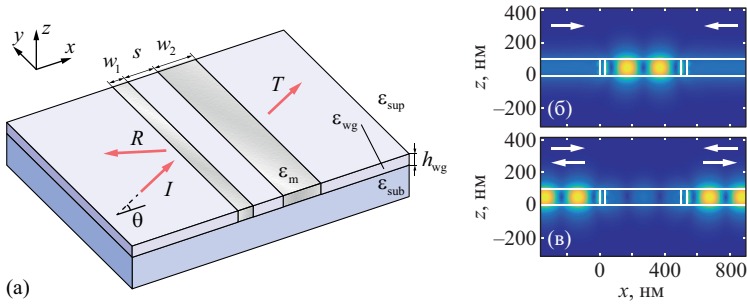


Рисунок 2 — Геометрия интегральной МДМ-структуры из двух металлических полос, интегрированных в плоскопараллельный диэлектрический волновод (а) и нормированные распределения напряженности магнитного поля $|\mathbf{H}(x, z)|$ для симметричной интегральной МДМ-структуры для случаев падения двух волн с равными комплексными амплитудами (случай когерентного полного поглощения) (б) и с комплексными амплитудами, отличающимися только знаками (в).

резонансов существенно изменяется вдоль дисперсионных кривых, в некоторых точках обращаясь в бесконечность, что свидетельствует о возникновении связанных состояний в континууме (рис. 3(б); показана зависимость отражения, рассчитанная для примера со следующими параметрами: толщина волновода $h_{wg} = 80$ нм, высота ступеньки $h_r = 30$ нм, остальные параметры совпадают с параметрами предыдущих примеров). Разработанная с использованием формализма матрицы рассеяния модель связанных волн с высокой точностью описывает резонансные особенности в спектрах структуры, подтверждает существование связанных состояний в континууме и их устойчивость к изменению параметров структуры, а также позволяет предсказать их положение в пространстве параметров. Для рассмотренного на рис. 3(б) пространства параметров (w, θ) положения ССК описываются выражениями

$$w = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\varphi^2 - \psi^2}{n_{\text{eff,TE,r}}^2 - n_{\text{eff,TM,r}}^2}}, \quad (5)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{1}{n_{\text{eff,TE}}} \sqrt{\frac{\varphi^2 n_{\text{eff,TM,r}}^2 - \psi^2 n_{\text{eff,TE,r}}^2}{\varphi^2 - \psi^2}} \right), \quad (6)$$

где $n_{\text{eff,TE,r}}$ и $n_{\text{eff,TM,r}}$ — эффективные показатели преломления ТЕ- и ТМ-поляризованных мод в области ступеньки, а величины φ и ψ имеют вид

$$\varphi = \pi m + \arg \frac{t_c}{r_c t - r_1 t_c}, \quad \psi = \pi l + \arg \frac{t}{r_c t_c - r_2 t}, \quad (7)$$

где m и l — целые числа одинаковой четности, а r_1 , r_2 , r_c , t и t_c — элементы матрицы рассеяния границы ступеньки.

В разделе 1.2 показана возможность применения предложенных структур в качестве интегрированных «на чипе» спектральных и пространственных фильтров,

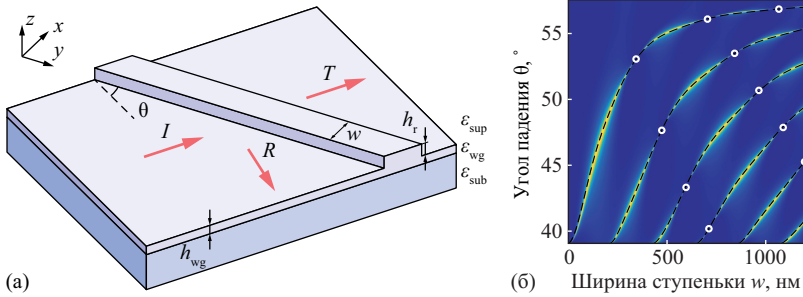


Рисунок 3 — Геометрия интегральной дифракционной структуры, состоящей из диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода (а). I , R , и T обозначают падающую, отраженную и прошедшую ТЕ-поляризованные моды соответственно. Зависимость отражения ступеньки от ее ширины и угла падения, рассчитанная с помощью метода фурье-мод (б). Пунктирные кривые показывают дисперсию мод и были рассчитаны на основе разработанной модели связанных волн. Кружки показывают положения ССК, рассчитанные на основе выражений (5)–(7).

аналоговых оптических дифференциаторов и интеграторов, а также интерферометров Жире–Турнуа.

В подразделе 1.2.1 показано, что предложенные резонансные структуры могут быть использованы в качестве узкополосных спектральных фильтров с близкой к лоренцевой формой пика, работающих в пропускании (фильтры на основе структуры из пары выемок на поверхности волновода) или в отражении (фильтры на основе структуры из ступеньки на поверхности волновода). За счет использования «каскадных» фильтров, состоящих из нескольких последовательно расположенных пар выемок или ступенек (рис. 4(а)), можно получить фильтры с формой пика, близкой к прямоугольной, и с существенно субнанометровой шириной пика при длине волны 630 нм. В частности, на рис. 4(б)–(г) показаны спектры отражения и пропускания структур, состоящих из двух, четырех или шести последовательно расположенных ступенек с шириной $w = 360$ нм на поверхности волновода. При $N = 2$ расстояние между ступеньками $l = 948$ нм было рассчитано аналитически, в этом случае спектр отражения описывается выражением для квадрата модуля передаточной функции фильтра Баттерворта:

$$\mathcal{R}_{\text{BW},N}(\lambda) = \frac{1}{1 + [(\lambda - \lambda_0)/\sigma]^2 2N}. \quad (8)$$

При $N = 4$ и $N = 6$ расстояния между ступеньками были прооптимизированы из условия получения спектров, описываемых выражением (8). В результате оптимизации были получены следующие значения: $l_1 = l_3 = 1285$ нм, $l_2 = 1410$ нм ($N = 4$) и $l_1 = l_5 = 1286$ нм, $l_2 = l_4 = 1405$ нм, $l_3 = 1282$ нм ($N = 6$).

В подразделе 1.2.2 показано, что с использованием предложенных резонансных структур могут быть эффективно выполнены следующие аналоговые преобразования оптических сигналов, распространяющихся в волноводе: пространственное, временное

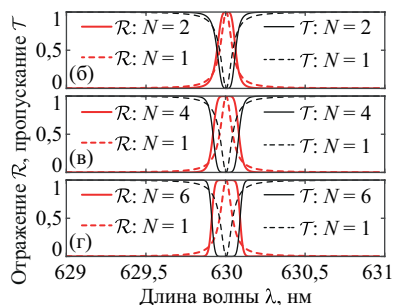
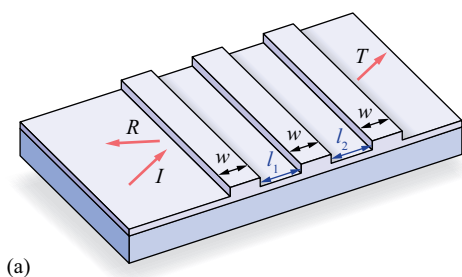


Рисунок 4 — Геометрия каскадной интегральной структуры из нескольких ступенек на поверхности волноводного слоя (а), спектры отражения (с резонансными максимумами) и пропускания (с резонансными минимумами) каскадных структур при $w = 360$ нм, $N = 2$ (б), $N = 4$ (в) и $N = 6$ (г). Штриховыми линиями показаны спектры исходной ступеньки.

или пространственно-временное дифференцирование в отражении профилей падающих пучков или импульсов в случае структуры из пары выемок на поверхности волновода, а также пространственное интегрирование в отражении и пространственное дифференцирование в пропускании профиля падающих пучков в случае структуры из ступеньки на поверхности волновода. Для рассмотренных примеров нормированное среднеквадратическое отклонение оптически вычисленных производных или первообразных от соответствующих аналитически рассчитанных значений составляет 1,2–4,7%. В частности, для ступеньки на поверхности волновода «пространственные» передаточные функции в отражении и пропускании, описывающие преобразование падающего пучка, распространяющегося в волноводе, имеют вид

$$H_R(k_{y,\text{inc}}) \approx \frac{\gamma}{k_{y,\text{inc}} - i\gamma}, \quad H_T(k_{y,\text{inc}}) \approx \alpha k_{y,\text{inc}}, \quad (9)$$

где γ — действительный коэффициент, обратно пропорциональный добротности резонанса, α — комплексный коэффициент, $k_{y,\text{inc}}$ — поперечная компонента волнового вектора в «локальной» системе координат, связанной с падающим пучком (рис. 5(г)). ПФ H_R в (9) представляет собой аппроксимацию ПФ идеального интегратора по пространственной переменной $H_{\text{int}}(k_{y,\text{inc}}) = 1/(ik_{y,\text{inc}})$, при этом точность аппроксимации увеличивается при увеличении добротности резонанса. ПФ H_T в (9) в первом приближении пропорциональна ПФ точного дифференциатора $H_{\text{diff}}(k_{y,\text{inc}}) = ik_{y,\text{inc}}$. Характерный пример ПФ H_R и выполнения операции пространственного интегрирования ступенькой показан на рис. 5(а)–(в). Выполнение ступенькой операций интегрирования в отражении и дифференцирования в пропускании схематично показано на рис. 5(г). Пример ПФ H_T и выполнения операции дифференцирования ступенькой показан на рис. 5(д)–(е).

В подразделе 1.2.3 показано, что дифракционные структуры на основе выемки или ступеньки, расположенных вблизи торца плоскопараллельного волновода, могут быть использованы в качестве интегральных интерферометров Жире–Турнуа. За счет использования «каскадной» структуры, состоящей из нескольких выемок, возможно получение требуемой групповой задержки или дисперсии групповой задержки в

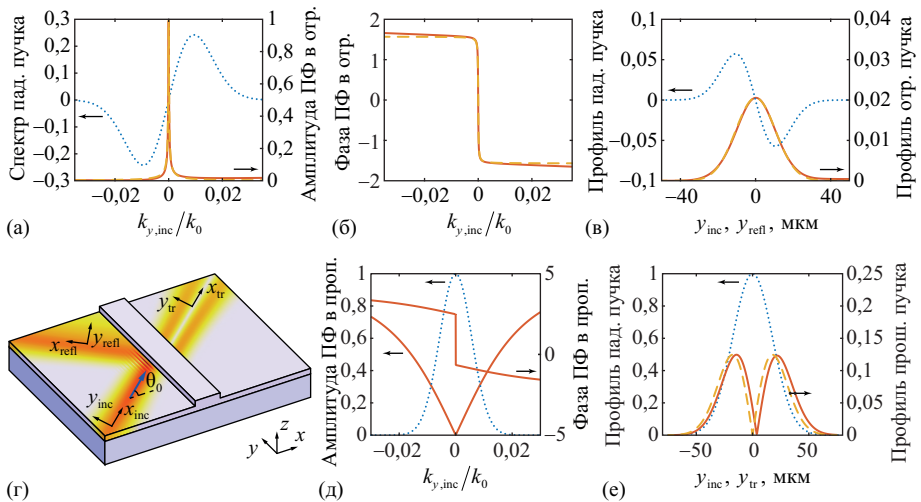


Рисунок 5 — Абсолютная величина и аргумент ПФ ступеньки в отражении, рассчитанной в точке $(w, \theta) = (355 \text{ нм}, 53,28^\circ)$ (а), (б). Точечная кривая показывает спектр падающего пучка, пунктирные кривые показывают аппроксимацию ПФ. (в) Абсолютная величина рассчитанного профиля отраженного пучка. Точечная кривая показывает профиль падающего пучка, пунктирная кривая показывает абсолютную величину аналитически рассчитанного интеграла. (г) Выполнение ступенькой операций интегрирования в отражении и дифференцирования в пропускании. (д) Абсолютная величина и аргумент ПФ ступеньки в пропускании, рассчитанной в точке $(w, \theta) = (200 \text{ нм}, 48,62^\circ)$. Точечная кривая показывает спектр падающего гауссова пучка. (е) Абсолютная величина рассчитанного профиля прошедшего пучка. Точечная кривая показывает падающий пучок, пунктирная кривая показывает абсолютную величину аналитически рассчитанной производной.

некотором рабочем диапазоне длин волн. Рассмотренный пример структуры позволил получить практически постоянную дисперсию групповой задержки, составляющую -100 фс^2 , в рабочем диапазоне длин волн шириной 50 нм. В структуре, состоящей из диэлектрической ступеньки перед торцом волновода, существуют «фазовые» связанные состояния в континууме и высокодобротные резонансы, которые с высокой точностью описываются разработанной моделью связанных волн.

Во **второй главе** теоретически и численно исследовано преобразование блоховских поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы раздела одномерного фотонного кристалла (ФК) и однородного диэлектрика, с помощью резонансных дифракционных структур, расположенных на поверхности ФК.

В разделе 2.1 приведено дисперсионное соотношение БПВ (подраздел 2.1.1, носящий вспомогательный характер) и исследована фазовая модуляция БПВ с помощью диэлектрических ступенек и выемок на поверхности ФК при нормальном (подраздел 2.1.2) и наклонном (подраздел 2.1.3) падении. Геометрия задачи дифракции БПВ на диэлектрической ступеньке и параметры рассмотренного примера показаны на

рис. 6(а). Установлено, что фазовая модуляция брэгговских поверхностных волн может быть осуществлена при нормальном падении БПВ на диэлектрическую ступеньку (или выемку) на поверхности фотонного кристалла за счет изменения ее ширины при фиксированной высоте или за счет изменения ее высоты при фиксированной ширине. Для рассмотренного примера (длина волны в свободном пространстве 800 нм, эффективный показатель преломления падающей ТЕ-поляризованной БПВ 1,44) в обоих случаях возможно осуществление фазовой модуляции в диапазоне $[0, 2\pi]$ при среднем пропускании БПВ, превышающем 0,82 (пропускание, фаза и фазовый набег БПВ, прошедшей через диэлектрическую ступеньку (выемку), относительно БПВ, распространяющейся по поверхности ФК в отсутствие ступеньки или выемки, показаны на рис. 6(б)–(г)). Фазовая модуляция за счет изменения ширины ступеньки при фиксированной высоте может быть также осуществлена при наклонном падении БПВ, при этом для рассмотренного примера (диапазон углов падения $[0, 85^\circ]$, эффективный показатель преломления БПВ в области ступеньки 1,74) средние потери на «паразитное» рассеяние БПВ при прохождении через диэлектрическую ступеньку не превышают 0,06, а среднее отклонение фазы БПВ, прошедшей через ступеньку, от «модельного» значения фазы плоской электромагнитной волны, прошедшей через плоскопараллельную пластинку, составляет лишь $\pi/70$.

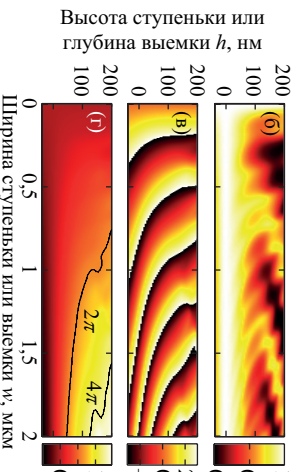
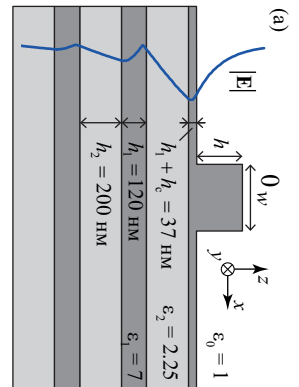


Рисунок 6 — Геометрия и параметры задачи дифракции БПВ на диэлектрической ступеньке на поверхности фотонного кристалла (а), пропускание (б) и фаза (в) БПВ, прошедшей через диэлектрическую ступеньку (выемку), и фазовый набег относительно БПВ, распространяющейся по поверхности ФК в отсутствие ступеньки или выемки (г) в зависимости от ширины и высоты ступеньки (выемки).

На основе полученных результатов в разделе 2.2 предложены и численно исследованы интервальные брэгговские решетки (подраздел 2.2.1) и брэгговские решетки с дефектным слоем (подраздел 2.2.2) для БПВ, а также показана возможность применения последних для оптического дифференцирования профилей импульсов и пучков БПВ (подраздел 2.2.3). Указанные брэгговские решетки представляют собой периодические наборы диэлектрических ступенек на поверхности ФК (в случае нормального падения БПВ направление периодичности структуры совпадает с направлением распространения падающей волны). Для рассмотренного примера брэгговская решетка из 16 периодов позволила получить отражение для расчетной длины волны 800

нм более 0,95 при потерях на паразитное рассеяние, не превышающих 0,04 (рис. 7(а)). За счет удвоения ширины центральной ступеньки брэгговской решетки из нечетного числа периодов возможно получение т. н. брэгговской решетки с дефектным слоем для БПВ, имеющей минимум отражения и близкое к единичному пропусканию на длине волны, близкой к расчетной (в частности, для БРДС из 17 «слоев» (ступенек и областей между ними) пропускание на длине волны 798,6 нм составляет 0,984, а отражение не превышает $2 \cdot 10^{-6}$). Предложенные БРДС для БПВ могут быть использованы для выполнения в отражении дифференцирования первого порядка по времени огибающей падающего импульса БПВ или дифференцирования первого порядка по пространственной координате профиля падающего пучка БПВ с высоким качеством. В частности, на рис. 7(б) показаны модуль и фаза «пространственной» ПФ, соответствующей коэффициенту отражения БРДС для БПВ при числе периодов с каждой стороны от дефектного слоя, равном 4. На рис. 7(б) также показан нормированный спектр падающего пучка. Согласно рис. 7(б), ПФ с точностью до линейной фазы хорошо соответствует ПФ дифференциатора. Линейная фаза описывает сдвиг отраженного пучка (эффект Гуса–Хенхен) и не влияет на качество дифференцирования. На рис. 7(в) показаны падающий пучок, модуль отраженного пучка и модуль аналитически вычисленной производной гауссовой функции. Модуль производной приведен с масштабным множителем, выбранным из условия совпадения максимумов аналитической производной и отраженного сигнала. Нормированное СКО между данными величинами составляет всего 0,63%, что говорит о высоком качестве дифференцирования. При этом максимальная амплитуда отраженного сигнала составляет 0,025.

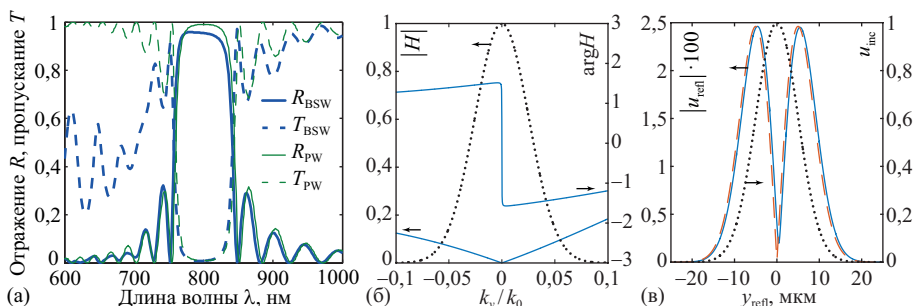


Рисунок 7 — Спектры отражения (сплошные линии) и пропускания (пунктирные линии) брэгговской решетки (16 периодов) для БПВ (толстые линии) и аналогичной решетки для плоской волны (тонкие линии) в зависимости от длины волны (а), амплитуда (левая вертикальная ось) и фаза (правая вертикальная ось) (сплошные кривые) «пространственной» ПФ БРДС для БПВ с 4 периодами с каждой стороны от дефектного слоя и спектр падающего пучка БПВ (точечная кривая) (б), модуль отраженного пучка (сплошная кривая), производная профиля падающего пучка (пунктирная кривая) (левая вертикальная ось) и профиль падающего пучка (точечная кривая, правая вертикальная ось) (в).

В разделе 2.3 исследовано подавление паразитного рассеяния БПВ (подраздел 2.3.1) и предложены и исследованы резонансные дифракционные структуры

для БПВ с подавлением рассеяния: диэлектрические ступеньки на поверхности ФК (подраздел 2.3.2) и интегральные дифракционные решетки для БПВ (подраздел 2.3.3), в которых существуют высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме. Установлено, что за счет выбора конфигурации запрещенных зон ФК и угла падения возможно полное устранение «паразитного» рассеяния БПВ при дифракции на диэлектрической ступеньке на поверхности ФК. В этом случае в спектрах отражения и пропускания ступеньки возникают резонансные пики отражения и минимумы пропускания. Резонансные особенности возникают при наклонном падении ТЕ-поляризованной БПВ в случае, когда вне ступеньки распространяющейся является только ТЕ-поляризованная БПВ, а внутри — как ТЕ-, так и ТМ-поляризованная БПВ. В ступеньке на поверхности ФК также существуют связанные состояния в континууме. Резонансные свойства структуры описываются моделью связанных волн, полностью аналогичной модели для ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода.

В интегральных дифракционных решетках для БПВ, представляющих собой периодический набор диэлектрических ступенек на поверхности ФК (рис. 8(а)), также возможно полное устранение паразитного рассеяния. Это возможно при наклонном падении БПВ в случаях, когда решетки работают в субволновом режиме, в котором распространяющимися являются только нулевой отраженный и нулевой прошедший порядки дифракции, или в т. н. геометрии Литрова, в которой распространяющимися являются нулевые и -1 -е порядки дифракции и направление распространения -1 -го отраженного порядка дифракции противоположно направлению распространения падающей волны. В этих случаях при отсутствии паразитного рассеяния в таких структурах могут существовать связанные состояния в континууме, а в их спектрах отражения и пропускания могут возникать резонансные особенности. Оптические свойства решеток и возникновение в них резонансных особенностей и ССК с высокой точностью описываются разработанными моделями связанных волн. В частности, на рис. 8(б) показано отражение (интенсивность нулевого отраженного порядка дифракции) субволновой интегральной решетки для БПВ со следующими параметрами: длина волны в свободном пространстве $\lambda = 630$ нм, показатели преломления материалов $n_1 = 3,32$, $n_2 = 1,48$, толщины слоев фотонного кристалла $h_1 = 25$ нм и $h_2 = 164$ нм, толщина верхнего слоя фотонного кристалла $h'_1 = 63$ нм ($h_c = 38$ нм), угол падения $\theta = 55^\circ$. Положения ССК, предсказываемые моделью связанных волн и полностью согласующиеся с результатами строгого численного моделирования, показаны кружками. Также показано, что резонансные субволновые решетки могут быть использованы как узкополосные спектральные или пространственные (угловые) фильтры для БПВ, работающие в отражении. Решетки, работающие в геометрии Литрова, могут быть использованы как эффективные делители или дефлекторы пучка БПВ, работающие в пропускании.

В **третьей главе** исследованы дифракционные структуры для поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границы раздела металла и диэлектрика.

В разделе 3.1 описан предлагаемый метод подавления «паразитного» рассеяния ППП при дифракции на диэлектрическом микрорельефе на поверхности металла, который может быть применен в широком диапазоне углов падения. Метод заключается в переходе к двухслойной геометрии рельефа, обеспечивающей частичное согласование

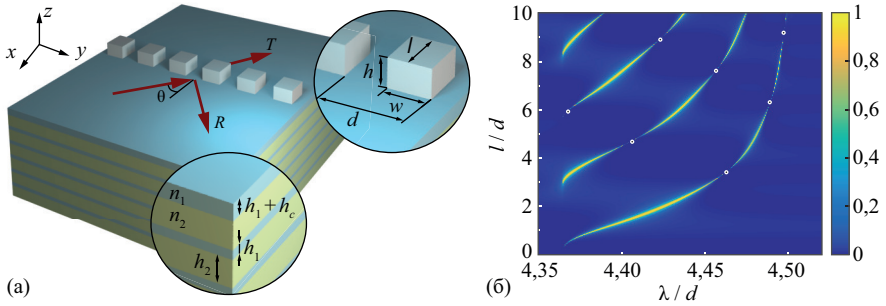


Рисунок 8 — Геометрия интегральной дифракционной решетки для блоховских поверхностных волн (а) и интенсивность нулевого отраженного порядка дифракции субволновой решетки для БПВ в зависимости от нормированных длины волны λ/d и длины решетки l/d (б). Кружки показывают положения ССК, предсказанные разработанной моделью связанных волн.

поперечного профиля электромагнитного поля падающего ППП и плазмонной моды в области рельефа. Зависимость от времени и координат поля ППП, распространяющегося вдоль границы раздела $z = 0$, имеет вид $\exp(-i\omega t + ik_x x + ik_y y - \kappa_j |z|)$, где индексы $j = d, m$ соответствуют диэлектрику (d) и металлу (m), а компоненты волнового вектора k_x, k_y, κ_z удовлетворяют дисперсионному соотношению ППП $k_x^2 + k_y^2 = k_{\text{spp}}^2 = k_0^2 \varepsilon_m \varepsilon_d / (\varepsilon_m + \varepsilon_d)$, $\kappa_j = \sqrt{k_{\text{spp}}^2 - k_0^2 \varepsilon_j}$, где ε_m и ε_d — диэлектрические проницаемости двух сред. В случае, когда после границы раздела находится двухслойный диэлектрический рельеф (рис. 9(а)), при достаточно большой толщине верхнего слоя h_2 можно описать плазмонную моду такой двухслойной структуры с помощью дисперсионного соотношения для ТМ-поляризованных мод плоскопараллельного волновода

$$\tanh(\gamma_1 h_1) = -\frac{\gamma_1 \varepsilon_1 (\varepsilon_2 \gamma_m + \varepsilon_m \gamma_2)}{\varepsilon_2 \varepsilon_m \gamma_1^2 + \varepsilon_1^2 \gamma_2 \gamma_m}, \quad (10)$$

где $\gamma_j^2 = k_{\text{mode}}^2 - k_0^2 \varepsilon_j$, $j = m, 1, 2$, k_{mode} — константа распространения плазмонной моды структуры. За счет выбора диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и толщины h_1 может быть обеспечено совпадение профилей поля падающего ППП и плазмонной моды в структуре при $h_1 < z < h_1 + h_2$. Совпадение поперечных профилей происходит при

$$\text{Re} \gamma_2 = \text{Re} \kappa_d. \quad (11)$$

Для рассмотренной «модельной» задачи прохождения ППП через диэлектрическую ступеньку с параметрами $\lambda = 800$ нм, $\varepsilon_m = -24,06 + 1,51i$ (соответствует золоту), $\varepsilon_d = 1$, $\varepsilon_1 = 1,45^2$, $\varepsilon_2 = 1,7^2$, $h_2 = 1,5$ мкм, средние потери на рассеяние ППП в диапазоне углов падения $[0, 85^\circ]$ уменьшаются на порядок с 0,2 (рис. 9(б)) до 0,027 (рис. 9(в)) при переходе от однослойной геометрии ступеньки ($h_1 = 0$) к двухслойной геометрии (значение $h_1 = 62$ нм, близкое к значению $h_1 = 57$ нм, обеспечивающему выполнение равенства (11), и полученное в результате дополнительной численной оптимизации).

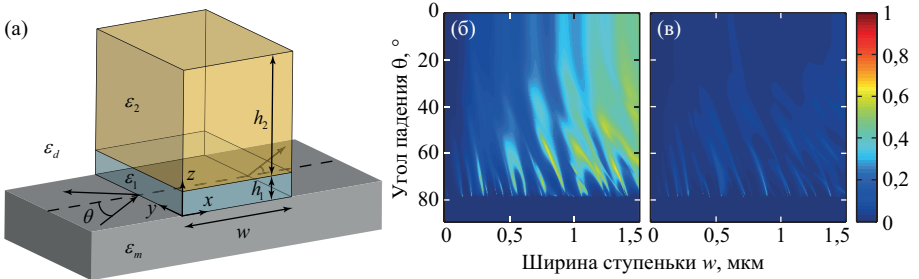


Рисунок 9 — Геометрия задачи дифракции ППП на двухслойной диэлектрической ступеньке (а) и потери на рассеяние ППП в зависимости от угла падения θ и ширины ступеньки w при $h_1 = 0$ (б) и $h_1 = 62$ нм (в).

На основе полученных результатов в следующих двух разделах предложен и исследован ряд оптических элементов для ППП с подавлением рассеяния. В разделе 3.2 рассмотрены массивы рефракционных линз (подраздел 3.2.1) и бинарных дифракционных линз с антиотражающими покрытиями (подраздел 3.2.2), а также брэгговские решетки для ППП (подраздел 3.2.3). Установлено, что предложенный подход для подавления паразитного рассеяния позволяет существенно увеличить эффективность указанных дифракционных структур для ППП. В частности, для рассмотренного примера массива рефракционных линз для ППП подавление паразитного рассеяния обеспечивает увеличение интенсивности в фокусе на 30% (рис. 10). Для массива бинарных дифракционных линз для ППП с подавлением паразитного рассеяния и антиотражающими областями интенсивность в фокусе также возрастает более чем на 30% по сравнению с аналогичным массивом с однослойной конфигурацией ступеньки без антиотражающих областей. В случае брэгговских решеток использование двухслойной геометрии ступеньки позволяет увеличить отражение в запрещенной зоне более чем на 10% и более чем в 2 раза уменьшить потери.

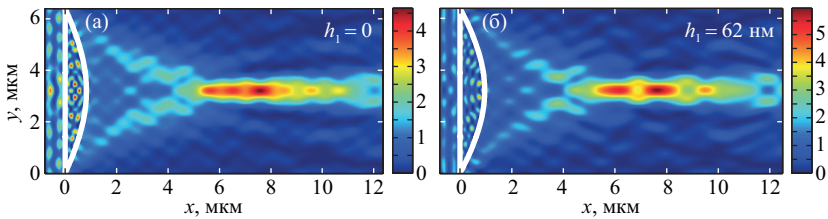


Рисунок 10 — Распределения величины $|E_z|^2$ на периоде массивов микролинз для ППП без подавления (а) и с подавлением (б) паразитного рассеяния.

В разделе 3.3 предложены и исследованы интегральные дифракционные решетки для поверхностных плазмон-поляритонов, представляющие собой периодические наборы диэлектрических ступенек на поверхности металла (с направлением периодичности, перпендикулярным направлению распространения ППП при нормальном падении,

рис. 11(а)). В частности, рассмотрены решетки с субволновым или близким к длине волны периодом (подраздел 3.3.1), широкополосные отражатели для ППП на основе высококонтрастных дифракционных решеток (подраздел 3.3.2), а также исследованы делители и дефлекторы пучков поверхностных плазмон-поляритонов на основе интегральных дифракционных решеток (подраздел 3.3.3). Установлено, что оптические свойства таких структур качественно, а при подавлении паразитного рассеяния и количественно близки к оптическим свойствам «обычных» дифракционных решеток. В субволновом режиме, в котором распространяющимися являются только нулевые отраженный и прошедший порядки дифракции, такие интегральные дифракционные решетки с подавлением рассеяния могут быть использованы в качестве компактных (имеющих субволновый размер в направлении, перпендикулярном направлению периодичности) узкополосных или широкополосных отражателей для ППП. Для рассмотренного примера узкополосной решетки-отражателя (длина волны в свободном пространстве 800 нм, нормальное падение ППП, $\varepsilon_m = -24,06 + 1,51i$, $\varepsilon_d = 1$, $\varepsilon_1 = 1,45^2$, $\varepsilon_2 = 1,7^2$, $h_1 = 70$ нм, $h_2 = 1$ мкм) максимальное отражение составляет 0,85 при пропускании менее 0,01 (точка, отмеченная звездочкой на рис. 11(б)). Распределение поля в структуре показано на рис. 11(в). Для рассмотренных широкополосных решеток-отражателей (центральная длина волны 1550 нм) среднее отражение составляет не менее 87,5% в диапазоне длин волн шириной 200 нм как в случае нормального падения ППП, так и в случае наклонного падения при угле падения 45° .

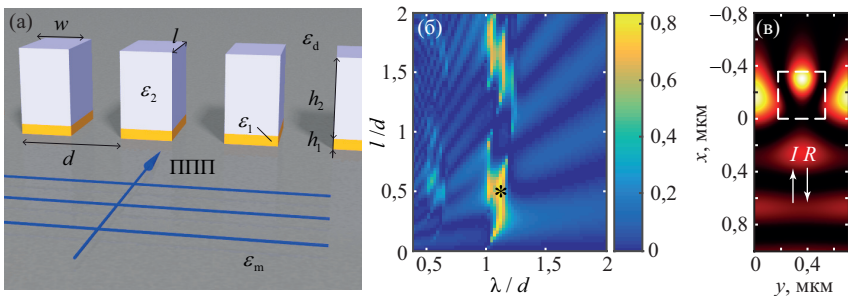


Рисунок 11 — Геометрия диэлектрической дифракционной решетки для ППП (а), интенсивность нулевого отраженного порядка дифракции плазмонной решетки с подавлением паразитного рассеяния в зависимости от нормированных длины волны λ/d и длины решетки l/d (б), распределение $|E_z|^2$ для точки, показанной звездочкой на (б) на расстоянии 10 нм над поверхностью металла (в). Стрелки показывают направление распространения падающей (I) и отраженной (R) волн.

Интегральные дифракционные решетки для ППП, у которых распространяющимися являются нулевые и -1 -е порядки дифракции, могут быть использованы в качестве делителей и дефлекторов пучка ППП, работающих в пропускании. Для рассмотренных примеров решеток без подавления паразитного рассеяния ППП суммарная интенсивность «рабочих» прошедших порядков дифракции составляет от 0,62 (для решетки-дефлектора пучка) до 0,77 (для решетки-делителя пучка), а суммарная

интенсивность остальных порядков дифракции при этом не превышает 0,02. Работоспособность делителей и дефлекторов пучка ППП подтверждена экспериментально (описание экспериментальных результатов приведено в **приложении А**).

Заключение

В диссертации предложен ряд резонансных дифракционных структур, реализующих преобразования волноводных мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов и поверхностных электромагнитных волн. Теоретически и численно в рамках электромагнитной теории дифракции исследованы резонансные оптические эффекты, возникающие в предложенных структурах. Представленные результаты исследований демонстрируют перспективность применения предложенных дифракционных структур в интегральных оптических системах для оптической фильтрации и аналоговых оптических вычислений.

В работе получены следующие основные результаты:

1. На основе численного моделирования в рамках строгой электромагнитной теории дифракции показано, что в спектрах отражения и пропускания дифракционной структуры, являющейся интегральным аналогом слоистой W-структуры и состоящей из двух выемок на поверхности плоскопараллельного диэлектрического волновода, могут возникать высокодобротные резонансы, проявляющиеся в виде нулей отражения и пиков пропускания с формой, близкой к лоренцевой. Резонансы возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода в случае, когда отсутствуют «паразитное» рассеяние из волновода и возбуждение ТМ-поляризованных мод. Установлено, что резонансы связаны с возбуждением вытекающих собственных мод ступеньки, ограниченной выемками. Показано, что добротность резонанса может изменяться за счет выбора ширины выемок, а его спектральное или угловое положение — за счет выбора ширины центральной ступеньки структуры. Показано, что данная структура может быть использована для оптического дифференцирования профиля (огигающей) падающего пространственного, временного или пространственно-временного оптического сигнала, распространяющегося в волноводе, с характерной ошибкой не более 1–5%.
2. На основе численного моделирования показано, что в дифракционной структуре, являющейся интегральным аналогом слоистой структуры «металл-диэлектрик-металл» и состоящей из двух металлических полос, «погруженных» в плоскопараллельный диэлектрический волновод, возможно получение полного поглощения (при падении одной моды) или когерентного полного поглощения (при падении двух мод с разных сторон структуры). Указанные эффекты имеют место при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды при отсутствии «паразитного» рассеяния и возбуждения ТМ-поляризованных мод. Установлено, что ширина получаемых пиков поглощения и минимумов отражения может варьироваться за счет изменения

- ширины центральной диэлектрической части структуры, разделяющей металлические полосы, а также за счет выбора материала металлических полос.
3. На основе численного моделирования показано, что в спектрах отражения и пропускания дифракционной структуры, состоящей из диэлектрической ступеньки на поверхности плоскопараллельного волновода, могут возникать резонансные особенности, проявляющиеся в виде нулей пропускания и пиков отражения с формой, близкой к лоренцевой. Данные особенности возникают при наклонном падении фундаментальной ТЕ-поляризованной моды волновода в диапазоне углов падения, обеспечивающем отсутствие «паразитного» рассеяния и существование ТМ-поляризованной моды внутри ступеньки. Установлено, что ширина резонансов существенно изменяется вдоль дисперсионных кривых, в некоторых точках обращаясь в нуль, что свидетельствует о возникновении связанных состояний в континууме. Разработана теоретическая модель связанных волн, с высокой точностью описывающая резонансные особенности, подтверждающая возникновение ССК, а также позволяющая описать их положение в пространстве параметров. Показано, что данная структура может быть использована для оптического интегрирования в отражении и дифференцирования в пропускании профиля падающего пучка, распространяющегося в волноводе, по пространственной координате с характерной ошибкой не более 5%. Теоретически и численно показано, что за счет использования «каскадных» структур из нескольких последовательно расположенных ступенек возможно получение резонансных пиков отражения с формой, близкой к прямоугольной.
 4. На основе численного моделирования показано, что дифракционные структуры, состоящие из диэлектрической ступеньки на торце плоскопараллельного диэлектрического волновода или выемки вблизи торца волновода, работающие в геометрии полного внутреннего отражения, могут быть использованы в качестве интерферометров Жире–Турнуа для волноводных мод, т. е. обеспечивают существенно нелинейную зависимость фазы отраженной моды от оптической длины пути в структуре. Показано, что в структуре, состоящей из диэлектрической ступеньки на торце волновода, существуют т. н. «фазовые» резонансы, проявляющиеся в резких изменениях фазы отраженной волны, и связанные состояния в континууме. Разработана теоретическая модель связанных волн, с высокой точностью описывающая указанные резонансные особенности и ССК.
 5. На основе численного моделирования показано, что дифракционные структуры, являющиеся интегральным аналогом брэгговских решеток с дефектным слоем для блоховских поверхностных волн и представляющие собой набор диэлектрических ступенек с нарушением периодичности на поверхности одномерного фотонного кристалла, имеют близкий к нулю (составляющий 10^{-8} – 10^{-6}) минимум отражения вблизи центра запрещенной зоны. Показано, что предложенные БРДС для БПВ могут быть использованы для выполнения дифференцирования первого порядка по времени или по пространственной

координате огибающей падающего импульса БПВ или профиля пучка БПВ при характерной ошибке дифференцирования в 0,5–5%.

6. Теоретически показано и на основе численного моделирования подтверждено, что в интегральных дифракционных решетках для БПВ, представляющих собой периодический набор диэлектрических ступенек на поверхности ФК, возможно полное устранение паразитного рассеяния БПВ за счет выбора конфигурации запрещенных зон ФК и угла падения в случаях, когда решетки работают в субволновом режиме или в геометрии Литрова. Установлено, что в этих случаях в интегральных решетках могут существовать высокодобротные резонансы и связанные состояния в континууме. Показано, что резонансные субволновые решетки могут быть использованы как узкополосные спектральные или пространственные (угловые) фильтры для БПВ, работающие в отражении. Интегральные решетки, работающие в геометрии Литрова, могут быть использованы как делители или дефлекторы пучка БПВ, работающие в пропускании. Разработаны модели связанных волн, с высокой точностью описывающие резонансные оптические свойства интегральных решеток и возникновение в них ССК.
7. На основе теоретического анализа и численного моделирования показано, что при дифракции поверхностного плазмон-поляритона на диэлектрической ступеньке на поверхности металла возможно осуществить уменьшение паразитного рассеяния ППП на порядок в широком диапазоне углов падения (от 0 до 85°) за счет перехода к двухслойной геометрии ступеньки, обеспечивающей частичное согласование поперечных профилей поля ППП вне ступеньки и в ней. Показано, что предложенный подход для подавления паразитного рассеяния позволяет увеличить эффективность ряда диэлектрических оптических элементов для ППП. В частности, установлено, что для массивов рефракционных и дифракционных линз интенсивность в фокусе в этом случае увеличивается на 10–30%. Для брэгговских отражающих решеток установлено, что при переходе к двухслойной ступеньке отражение в запрещенной зоне увеличивается более чем на 10%, а потери на рассеяние уменьшаются более чем в 2 раза.
8. На основе численного моделирования показано, что оптические свойства интегральных дифракционных решеток для ППП, представляющих собой периодические наборы диэлектрических ступенек на поверхности металла, качественно, а при подавлении паразитного рассеяния и количественно близки к оптическим свойствам неинтегральных дифракционных решеток. Показано, что в субволновом режиме такие интегральные структуры с подавлением рассеяния могут быть использованы в качестве компактных (имеющих субволновый размер в направлении, перпендикулярном направлению периодичности) узкополосных или широкополосных отражателей для ППП с отражением порядка 0,85. Также показано, что интегральные дифракционные решетки для ППП, у которых распространяющимися являются нулевые и -1 -е порядки дифракции, могут быть использованы в качестве делителей и дефлекторов пучка ППП, работающих в пропускании.

Дальнейшие перспективы развития исследований связаны с несколькими направлениями. Во-первых, представляет интерес «перенос» результатов, полученных в работе для одной из рассмотренных интегральных «платформ» (волноводных мод плоскопараллельных диэлектрических волноводов, блоховских поверхностных волн или поверхностных плазмон-поляритонов) на другие платформы, в частности, исследование возможности создания широкополосных отражателей для волноводных мод и блоховских поверхностных волн на основе интегральных аналогов высококонтрастных дифракционных решеток. Во-вторых, актуально исследование «каскадных» интегральных дифракционных решеток, состоящих из нескольких последовательно расположенных периодических наборов диэлектрических «столбиков» на поверхности волновода или поверхности распространения поверхностной электромагнитной волны. Аналогично каскадным структурам из нескольких ступенек на поверхности волновода, использование каскадных решеток обеспечит дополнительные возможности по контролю формы резонансных особенностей, возникающих в спектрах отражения и пропускания структуры. Наконец, перспективным представляется изучение оптических свойств дифракционных структур, аналогичных исследованным в работе, у которых один или несколько геометрических параметров изменяются (например, линейно) вдоль одной из пространственных координат (вдоль ступеньки (выемки) или вдоль направления периодичности в случае интегральных дифракционных решеток). В качестве такого параметра может выступать, например, ширина центральной ступеньки в W-структуре. Изменение параметра (или параметров) приведет к изменению резонансной длины волны вдоль структуры, таким образом, разные части структуры позволят осуществлять спектральную фильтрацию различных длин волн. Такие структуры могут стать основой для создания т. н. линейно изменяющихся фильтров для волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и (или) индексируемых в Web of Science/Scopus

1. Bykov D. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L. Coherent perfect absorption and lasing in bimodal Fabry–Pérot interferometers // *Physical Review A*. — 2025. — Vol. 112, no. 5. — P. 053512.
2. On-chip spatiotemporal optical vortex generation using an integrated metal–dielectric resonator / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus et al. // *Optics & Laser Technology*. — 2024. — Vol. 174. — P. 110584.
3. Differentiation of optical signals using an integrated metal–dielectric–metal structure / A. I. Kashapov, E. A. Bezus, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2024. — Vol. 88, no. 1. — Pp. 1–5.
4. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Total absorption and coherent perfect absorption in metal–dielectric–metal resonators integrated into a slab waveguide // *Optics Letters*. — 2022. — Vol. 47, no. 17. — Pp. 4403–4406.

5. Integrated resonant diffraction gratings for Bloch surface waves / E. A. Bezus, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, E. A. Kadomina // *Optical Memory and Neural Networks*. — 2022. — Vol. 31, no. Suppl. 1. — Pp. 8–13.
6. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Integrated diffraction gratings on the Bloch surface wave platform supporting bound states in the continuum // *Nanophotonics*. — 2021. — Vol. 10, no. 17. — Pp. 4331–4340.
7. Bezus E. A., Doskolovich L. L. Broadband mirrors for surface plasmon polaritons using integrated high-contrast diffraction gratings // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29, no. 3. — Pp. 4022–4034.
8. Bezus E. A. Bound states in the continuum in a dielectric ridge on the surface of a one-dimensional photonic crystal // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2021. — Vol. 85, no. 12. — Pp. 1492–1495.
9. Bykov D. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L. Bound states in the continuum and strong phase resonances in integrated Gires–Tournois interferometer // *Nanophotonics*. — 2020. — Vol. 9, no. 1. — Pp. 83–92.
10. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Integrated Gires–Tournois interferometers based on evanescently coupled ridge resonators // *Optics Letters*. — 2020. — Vol. 45, no. 18. — Pp. 5065–5068.
11. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Integrated flat-top reflection filters operating near bound states in the continuum // *Photonics Research*. — 2019. — Vol. 7, no. 11. — Pp. 1314–1322.
12. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Two-groove narrowband transmission filter integrated into a slab waveguide // *Photonics Research*. — 2018. — Vol. 6, no. 1. — Pp. 61–65.
13. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab waveguide // *Photonics Research*. — 2018. — Vol. 6, no. 11. — Pp. 1084–1093.
14. Spatial integration and differentiation of optical beams in a slab waveguide by a dielectric ridge supporting high-Q resonances / E. A. Bezus, L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Optics Express*. — 2018. — Vol. 26, no. 19. — Pp. 25156–25165.
15. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. On the relation between the propagation constant of Bloch surface waves and the thickness of the upper layer of a photonic crystal // *Computer Optics*. — 2018. — Vol. 42, no. 1. — Pp. 22–27.
16. Kadomina E. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L. Bragg gratings with parasitic scattering suppression for surface plasmon polaritons // *Computer Optics*. — 2018. — Vol. 42, no. 5. — Pp. 800–806.
17. Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, N. V. Golovastikov et al. // *Optics Express*. — 2017. — Vol. 25, no. 19. — Pp. 22328–22340.
18. Spatial differentiation of Bloch surface wave beams using an on-chip phase-shifted Bragg grating / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. — 2016. — Vol. 18, no. 11. — P. 115006.
19. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Soifer V. A. Near-wavelength diffraction gratings for surface plasmon polaritons // *Optics Letters*. — 2015. — Vol. 40, no. 21. — Pp. 4935–4938.

20. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Phase-shifted Bragg gratings for Bloch surface waves // *Optics Express*. — 2015. — Vol. 23, no. 21. — Pp. 27034–27045.
21. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Antireflection layers in low-scattering plasmonic optics // *Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications*. — 2015. — Vol. 14. — Pp. 101–105.
22. Bezus E. A., Doskolovich L. L. Refraction and phase modulation of surface electromagnetic waves propagating at the boundary of a one-dimensional photonic crystal // *Optics and Spectroscopy*. — 2015. — Vol. 119, no. 5. — Pp. 784–788.
23. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L. Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, no. 11. — Pp. 13547–13554.
24. Phase modulation of Bloch surface waves with the use of a diffraction microrelief at the boundary of a one-dimensional photonic crystal / E. A. Bezus, L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *JETP Letters*. — 2014. — Vol. 99, no. 2. — Pp. 63–66.
25. Bezus E. A., Doskolovich L. L. Phase modulation and refraction of surface plasmon polaritons with parasitic scattering suppression // *Computer Optics*. — 2014. — Vol. 38, no. 4. — Pp. 623–628.
26. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L. Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure // *Applied Physics Letters*. — 2011. — Vol. 98, no. 22. — P. 221108.
27. Scattering in elements of plasmon optics suppressed by two-layer dielectric structures / E. A. Bezus, L. L. Doskolovich, N. L. Kazanskiy, V. A. Soifer // *Technical Physics Letters*. — 2011. — Vol. 37, no. 12. — Pp. 1091–1095.
28. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L. Insulator–insulator–metal plasmonic waveguide for parasitic scattering suppression in plasmonic optics // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2011. — Vol. 75, no. 12. — Pp. 1573–1575.

Публикации в трудах конференций, индексируемых в Web of Science/Scopus

29. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Integrated high-contrast diffraction gratings for surface electromagnetic waves // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 2015. — 2021. — P. 012037.
30. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Gires–Tournois interferometers for modes of dielectric slab waveguides // 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) / IEEE. — 2021. — P. 9649122.
31. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Bound states in the continuum in abruptly terminated dielectric slab waveguides // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1461. — 2020. — P. 012204.
32. Bezus E., Bykov D., Doskolovich L. Integrated spectral filters consisting of several dielectric ridges on the surface of a slab waveguide // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) / IEEE. — 2020. — P. 9253318.
33. Kadomina E., Bezus E., Doskolovich L. Parasitic scattering of Bloch surface waves // 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) / IEEE. — 2020. — P. 9253223.

34. *Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A.* High-Q resonances supported by a single dielectric ridge on the surface of a slab waveguide // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1092. — 2018. — P. 012024.
35. *Bezus E. A., Doskolovich L. L., Bykov D. A.* Integrated W-type structure for spectral and spatial filtering of optical radiation propagating in a slab waveguide // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1092. — 2018. — P. 012010.
36. *Kadomina E. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L.* Low-scattering Bragg gratings for surface plasmon polaritons // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1096. — 2018. — P. 012022.
37. On-chip phase-shifted Bragg gratings and their application for spatiotemporal transformation of Bloch surface waves / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, N. V. Golovastikov // *Proceedings of SPIE*. — Vol. 10227. — 2017. — P. 102270A.
38. On-chip near-wavelength diffraction gratings for surface electromagnetic waves / E. A. Bezus, V. V. Podlipnov, A. A. Morozov, L. L. Doskolovich // *Proceedings of SPIE*. — Vol. 10227. — 2017. — P. 1022709.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

39. *Безус Е. А., Быков Д. А., Досколович Л. Л. и др.* Программный модуль “aFMM-Ridge” для моделирования дифракции мод плоскопараллельного волновода на диэлектрической ступеньке или выемке на его поверхности. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689929, Российская Федерация. — 2025. — Заявка № 2025689355 от 27.10.2025; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.10.2025. Правообладатель: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева.

Монографии

40. *Diffraction optics and nanophotonics* / E. A. Bezus, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich et al.; Ed. by V. A. Soifer. — Boca Raton: CRC Press, 2017. — 718 pp.
41. Нанопотоника и ее применение в системах ДЗЗ / Е. А. Безус, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович и др.; Под ред. В. А. Сойфера. — Самара: Новая техника, 2016. — 384 с.
42. Дифракционная оптика и нанопотоника / Е. А. Безус, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович и др.; Под ред. В. А. Сойфера. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 608 с.