

**Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

Объект авторского права

УДК 535.3; 535.015; 535:530.182

НОВИЦКИЙ
Денис Викторович

**ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА С
РЕЗОНАНСНЫМИ СРЕДАМИ И АКТИВНЫМИ
МНОГОСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск 2024

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Официальные оппоненты: **Килин Сергей Яковлевич,**

академик, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий центром «Квантовая оптика и квантовая информатика» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

Семченко Игорь Валентинович,

член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной деятельности ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Толстик Алексей Леонидович,

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета

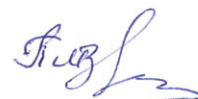
Оппонирующая организация: **Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета**

Защита состоится 9 апреля 2024 г. в 14³⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68-2, тел. ученого секретаря совета 270-87-98, e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

Автореферат разослан “7” марта 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук



М. В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

Современная оптика немислима без стремления к миниатюризации, что подразумевает создание и использование материалов, структурированных на масштабах порядка длины волны электромагнитного излучения и менее. Для излучения оптического диапазона с длиной волны порядка 1 мкм этот тренд означает рассмотрение процессов взаимодействия света с веществом на наномасштабах. Так появилась нанофотоника как междисциплинарное направление, использующее знания из оптики, электроники, физики конденсированных сред, физической химии. Нанофотоника оказалась чрезвычайно плодотворной областью науки, не только породив новые фундаментальные идеи, но и поспособствовав появлению множества приложений, включающих светоизлучающие (светодиоды и лазеры) и светопоглощающие (фотовольтаические) структуры, структурированные волноводы и элементы фотонной схемотехники, фотонные наносенсоры различных типов т.д. Детальное понимание фундаментальных механизмов взаимодействия электромагнитного излучения с различными типами сред и структурированных материалов требует проведения тщательных теоретических исследований оптических процессов, происходящих на микро- и наноуровне. Одним из аспектов такого всестороннего понимания является анализ динамики процессов во времени, чему в основном и посвящено настоящее диссертационное исследование.

В диссертации изучена динамика взаимодействия импульсного и (квази)непрерывного излучения с рядом принципиально важных объектов современной оптики и фотоники – резонансными двухуровневыми средами, нелинейными фотонными кристаллами, разупорядоченными многослойными структурами, активными системами. Полученные результаты позволили по-новому взглянуть на поведение фотонных структур, содержащих нелинейные, поглощающие и усиливающие среды, и предсказать на этой основе новые эффекты.

Резонансные двухуровневые среды – классический для оптики объект исследований, позволивший объяснить многие базовые явления нелинейной оптики и лазерной физики. Несмотря на кажущуюся простоту этой модели, нелинейность её уравнений чрезвычайно расширяет разнообразие возможных режимов взаимодействия света с такой средой. Однако многие детали динамики столкновений импульсов, учёта неоднородного уширения резонансной линии и чирпа импульса, применимости популярного приближения вращающейся волны, учёта случайных вариаций параметров среды оставались непрояснёнными. В диссертации, отталкиваясь от эффекта самоиндуцированной прозрачности когерентных импульсов в двухуровневых средах, последовательно рассматриваются ситуации всё возрастающей сложности, связанные с эффек-

тами распространения немонахроматического излучения (импульсов и кинков) в таких средах. Модель резонансной среды полезна и при рассмотрении так называемых неэрмитовых фотонных структур, позволяя единым образом описать поведение поглощающих и усиливающих компонент таких систем.

Другой основной объект исследований в диссертации – это активные фотонные структуры. В современной литературе «активность» часто понимается как синоним перестраиваемости, управляемости, когда оптические свойства фотонной структуры могут изменяться под внешним воздействием (механическом, электрическом, оптическом и т.д.). Пожалуй, наиболее популярным и изученным является подход, основанный на использовании нелинейных сред, которые изменяют свои характеристики в ответ на внешнее оптическое излучение. В диссертации рассматриваются нелинейные одномерные фотонные кристаллы, представляющие собой слоистые периодические структуры с периодом порядка длины волны излучения. Изменение под действием излучения характеристик материалов, составляющих структуру, позволяет кардинальным образом перестраивать оптический отклик таких систем и, в частности, реализовать локализацию излучения в малой области пространства. Развитие таких процессов во времени под действием сверхкороткого импульса света и с учётом конечного времени релаксации нелинейности заслуживает тщательного исследования.

Другой смысл термина «активность» используется в лазерной физике и подразумевает рассмотрение структур, содержащих активные среды с инверсией населённостей и способных усиливать распространяющееся в них излучение. В последние годы усиливающие среды стали всё сильнее проникать в нанофотонику: сначала как средство компенсации потерь в плазмонных структурах и метаматериалах, а затем – как компонент перспективных фотонных структур нового типа. Результатом стало возникновение целого нового направления оптической науки – неэрмитовой фотоники, изучающей системы с нетривиальным пространственным распределением усиливающих и поглощающих излучение материалов. Особого внимания заслуживает одна из базовых разновидностей активных структур, содержащих усиливающие компоненты, – слоистые системы с чередующимися слоями поглощающих и усиливающих сред. Металлодиэлектрические слоистые структуры могут выступать в качестве гиперболических метаматериалов, практическое использование которых ставит задачу о компенсации в них потерь излучения. На основе слоистой геометрии могут строиться \mathcal{PT} -симметричные неэрмитовы структуры, которые характеризуются сбалансированным распределением поглощения и усиления в пространстве и в которых наблюдаются процессы нарушения симметрии в точках спектрального вырождения специального типа – исключительных точ-

ках. Перспективы использования таких систем для реализации асимметричного пропускания света, лазерной генерации, эффекта когерентного идеального поглощения и других явлений ставит актуальный вопрос о стационарных оптических характеристиках и динамике излучения в таких системах, особенно в окрестности исключительных точек.

До сих пор речь шла об идеальных структурах, характеризующихся совершенной периодичностью или полностью согласованными значениями параметров всех компонент. В последние годы всё большее внимание привлекают разупорядоченные структуры, свойства которых случайным образом изменяются в пространстве. Исторически интерес к данной тематике восходит к исследованиям по оптике рассеивающих сред, однако в последние годы внимание смещается от изучения разнообразных случайных несовершенств структуры и способов борьбы с ними к сознательному конструированию разупорядоченных систем, обладающих новыми интересными и зачастую необычными свойствами. В диссертационной работе упомянутые выше системы (нелинейные фотонные кристаллы и резонансные среды) обобщены на разупорядоченный случай, что позволяет изучить новые закономерности распространения сверхкоротких импульсов света в таких структурах, в том числе поставить вопрос о взаимовлиянии эффектов беспорядка и нелинейности в таких системах.

Наконец, в диссертационной работе изучаются некоторые особенности конкретного светоизлучающего устройства – лазера на красителях с распределённой обратной связью (РОС), который можно рассматривать в качестве примера активной периодической структуры. Недостаточно изученной остаётся необычная модификация РОС-лазера, в которой генерация происходит на светоиндуцированной поляризационной решётке и которая представляет интерес как стабильный источник коротких импульсов поляризованного света. Это делает актуальной задачу построения теоретической модели динамики генерации таких лазеров и сравнения результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными.

Настоящее диссертационное исследование находится на стыке физики взаимодействия света с веществом, нелинейной оптики, лазерной физики и нанофотоники – наиболее актуальных направлений современной оптической науки. С практической точки зрения рассматриваемые активные и перестраиваемые структуры привлекают внимание как основа для новых типов лазеров и усилителей, высокочувствительных сенсоров, оптических переключателей, оптических диодов и других компонентов фотоники и оптоэлектроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Лаборатории гетерогенных органических сред и центре «Нанопотоника» Института физики НАН Беларуси в рамках следующих научных программ и проектов:

- Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника», задание 2.3.01 “Разработка препаратов и высокочувствительных лазерно-оптических методов медицинской диагностики биотканей, определение критериев эффективности терапевтического воздействия факторов физической природы; создание научной базы лечебного применения препаратов и лазерно-оптической аппаратуры нового поколения” (2011-2013, номер гос. регистрации 20120285);
- Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника», задание 2.3.05 “Разработка методов, аппаратных средств и препаратов для оптической диагностики и фототерапии патологических состояний организма с использованием лазерных и светодиодных источников” (2014-2015, номер гос. регистрации 20141964);
- Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 1.2.02 “Оптические наносенсоры и фоточувствительные наноструктуры” (2016-2020, номер гос. регистрации 20160046);
- Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», задание 1.5 “Оптические антенны, РТ-симметричные и коллоидные светодиодные структуры без применения эпитаксиальных технологий на основе полупроводниковых, металлических и диэлектрических наноструктур сложной топологии” (2021-2025, номер гос. регистрации 20210418);
- проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) №Ф11М-008 “Локализация и распространение сверхкоротких импульсов света в фотонных кристаллах с инерционной кубической нелинейностью” (2011-2013, номер гос. регистрации 20121007);
- проекта БРФФИ №Ф13М-038 “Взаимодействие сверхкоротких импульсов света с нелинейными разупорядоченными фотонными структурами” (2013-2015, номер гос. регистрации 20131003);
- проекта БРФФИ №Ф15-042 “Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик вынужденного излучения, формируемого на све-

тоиндуцированных поляризационных решетках” (2015-2017, номер гос. регистрации 20150866);

- проекта БРФФИ №Ф16К-016 “Нестационарные процессы в активных микро- и наноструктурах, содержащих плазмонные и усиливающие компоненты” (2016-2018, номер гос. регистрации 20164535);
- проекта БРФФИ №Ф18-049 “Эффекты взаимодействия световых волн с разупорядоченными резонансными средами” (2018-2020, номер гос. регистрации 20181172);
- проекта БРФФИ №Ф20Р-158 “Связанные состояния в континууме в неэрмитовых многослойных структурах” (2020-2022, номер гос. регистрации 20200957).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы (п. 6 – Электроника и фотоника) и приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы (п. 4 — Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы — провести всестороннее теоретическое исследование закономерностей временной динамики взаимодействия электромагнитного излучения с резонансными средами и многослойными структурами, содержащими нелинейные, поглощающие и усиливающие компоненты, в квазинепрерывном и импульсном режимах, а также обосновать возможности использования обнаруженных эффектов для управления характеристиками оптического излучения. Для достижения данной цели был поставлен ряд *задач*:

- Реализовать алгоритмы численного моделирования распространения импульсного и квазинепрерывного излучения в резонансных средах, нелинейных фотонных кристаллах, активных слоистых структурах;
- Исследовать процессы формирования солитонов самоиндуцированной прозрачности и взаимодействия попутно и встречно распространяющихся импульсов в резонансных двухуровневых средах, в том числе с учётом неоднородного уширения среды и чирпа импульса;
- Установить механизм и условия локализации импульсов света в фотонных кристаллах с инерционной нелинейностью, а также закономерности изменения свойств излучения, взаимодействующего с такими структурами;
- Определить режимы взаимодействия сверхкоротких импульсов света с разупорядоченными нелинейными фотонными кристаллами и разупорядоченными структурами на основе резонансных сред;

- Провести теоретический анализ взаимодействия квазинепрерывного излучения с неэрмитовыми слоистыми структурами и выявить особенности оптического отклика, связанные с нарушением в них \mathcal{PT} -симметрии;
- Построить теоретическую модель РОС-лазера на поляризационных решётках и проанализировать рассчитанные с её помощью динамические и энергетические характеристики генерации в сравнении с экспериментальными данными.

Объект исследования — резонансные двухуровневые среды и слоистые структуры, содержащие нелинейные, поглощающие и усиливающие компоненты. *Предмет* исследования — оптический отклик указанных объектов, его изменение во времени и возможность практического использования для управления характеристиками оптического излучения.

Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в получении ряда новых результатов в теории взаимодействия света с веществом, нелинейной оптике, нанофотонике, оптике наноструктур, физике лазеров. В частности, автором впервые:

- детально исследованы закономерности взаимодействия встречно распространяющихся когерентных импульсов света в резонансно поглощающих средах и предсказаны эффекты управляемого поглощения и асимметричного пропускания таких импульсов;
- предсказано влияние релаксации нелинейности на динамику распространения и локализации одиночного и нескольких сверхкоротких импульсов света в одномерных фотонных кристаллах, в том числе при наличии случайных вариаций параметров структуры;
- предложена концепция разупорядоченной резонансной среды, свойства которой меняются случайным образом в направлении распространения излучения и в которой может наблюдаться явление андерсоновской локализации импульсов самоиндуцированной прозрачности;
- обоснована модель неэрмитовых структур на основе резонансно поглощающих и усиливающих сред, которая позволила установить новые свойства \mathcal{PT} -симметричных слоистых структур, связанные с существованием в их спектрах исключительных точек;
- разработана теоретическая модель РОС-лазера на поляризационных решётках, позволяющая описывать динамику и энергетику генерации таких лазеров.

Положения, выносимые на защиту

1. Неупругие столкновения встречных солитонов самоиндуцированной прозрачности и встречных кинков, сопровождающиеся энергообменом между ними и с двухуровневой резонансной средой, позволяют управлять уровнем пропускания излучения и временем его распространения и приводят при определённых условиях, зависящих от степени неоднородного уширения среды, интенсивности и длительности импульсов и наличия у них чирпа, к явлениям полного поглощения и невзаимного пропускания импульсов.

2. Нарушение периодического изменения показателя преломления вследствие самоиндуцированной локализации фемтосекундного импульса света в одномерном фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью с временем релаксации до 10 фс ведёт к управляемому изменению спектрального состава излучения, асимметричному пропусканию и захвату импульса, индуцированному другим импульсом.

3. В пассивных и активных резонансных средах, параметры которых изменяются случайным образом в направлении распространения излучения, в зависимости от степени разупорядоченности существуют режимы самоиндуцированной прозрачности, локализации и усиления фемтосекундных оптических импульсов. Переход между этими режимами сопровождается изменением скорости распространения электромагнитного сигнала и может регулироваться с помощью другого импульса.

4. Для многослойных фотонных структур, содержащих поглощающие и усиливающие материалы, модель резонансной двухуровневой среды позволяет дать самосогласованное описание динамики оптического поля и внутреннего состояния среды с учётом явления насыщения и предсказать новые эффекты, такие как компенсация поглощения и резонансное усиление пропускания в активных металлодиэлектрических структурах и асимметричная направленная генерация излучения в \mathcal{PT} -симметричных структурах, а также определить оптимальные условия для наблюдения режима лазера-поглотителя.

5. Явление спонтанного нарушения \mathcal{PT} -симметрии с учётом изменения коэффициента поглощения и усиления позволяет управлять величиной добротности резонансных мод типа связанного состояния в континууме, которые возбуждаются в \mathcal{PT} -симметричных трёхслойных структурах, содержащих материалы с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью. В асимметричных структурах такого типа возникает эффект лазера-поглотителя, ассоциированный с возбуждением квазисвязанных состояний в континууме и обусловленный совпадением нулей и полюсов матрицы рассеяния системы.

6. Разработанная автором модель лазера на красителях с распределённой обратной связью (РОС) на поляризационных решётках дихроизма усиления,

основанная на обобщении балансных уравнений для концентрации возбуждённых молекул и плотности фотонов генерации с целью учёта пространственного распределения возбуждённых молекул различных ориентаций, позволяет описать динамику и энергетику генерации РОС-лазера в хорошем качественном соответствии с экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя учёной степени в результаты диссертации

Представленные в диссертационной работе результаты получены лично соискателем, который участвовал в обсуждении результатов и написании текстов всех публикаций. В работах [17, 41, 42, 43, 44, 45] соискатель отвечал за теоретическую часть, развивая модель РОС-лазера на поляризационных решётках; В. М. Катаркевич и Т. Ш. Эфендиев участвовали в постановке задачи и проведении экспериментальных исследований. В статье [19] соискатель предложил идею и провёл расчёты для случая нормального падения. В работах [23, 51] А. В. Новицкий поставил задачу и предложил теорию нелокальной гомогенизации, а соискатель провёл расчёты для её проверки и проанализировал их результаты. В работах [27, 52] А. В. Новицкий принимал участие в постановке задачи и развил аналитическую теорию, соискателю принадлежат численные расчёты динамики во временной области и их анализ. В статье [31] задача была поставлена В. Р. Тузом; соискателю принадлежит разработка аналитической модели связанных осцилляторов, которая использовалась для сравнения с результатами численных расчётов. Остальные соавторы участвовали в обсуждении результатов и написании публикаций. 29 работ опубликованы соискателем без соавторов.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на Международных школах-конференциях молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» (Минск, 2010, 2012, 2014 и 2016); Международных научных конференциях «Лазерная физика и оптические технологии» (Минск, 2010; Гродно, 2012); Конгрессах физиков Беларуси (Минск, 2013, 2015 и 2017); Международной конференции «Дни дифракции» (Санкт-Петербург, 2014); Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2015); Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике ICONO/LAT (Минск, 2016); Международной конференции по лазерной оптике ICLO (Санкт-Петербург, 2018); Международных конференциях по метаматериалам и нанофотонике METANANO (Сочи, 2018; Санкт-Петербург, 2019; онлайн, 2020 и 2021); Международном семинаре «Нелинейные процессы в сложных системах» (Минск, 2019); Алфёровских

чтениях, посвящённых 90-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии, академика Ж. И. Алфёрова (Минск, 2020); Международной конференции по кооперации и интеграции промышленности, образования, исследований и приложений (Китай, онлайн, 2021).

Результаты диссертационной работы использованы в образовательном процессе на кафедре физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета и в научной работе лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института (акты о практическом использовании представлены в ПРИЛОЖЕНИИ Б диссертации).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 55 научных работах, в числе которых: 1 глава в коллективной монографии, 31 статья в рецензируемых научных журналах в соответствии с п. 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь, 20 статей в сборниках материалов научных конференций и 3 публикации в сборниках тезисов научных конференций. Общий объём опубликованных материалов составляет 32,5 авторских листа.

Структура и объём диссертации

Диссертация включает в себя оглавление, введение, общую характеристику работы, пять глав, заключение, библиографический список и два приложения. Полный объём диссертации составляет 332 страницы. Диссертация содержит 147 рисунков, занимающих в совокупности 78 страниц. Список использованных источников занимает 46 страниц и включает 624 наименования, в том числе 55 работ, опубликованных соискателем учёной степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

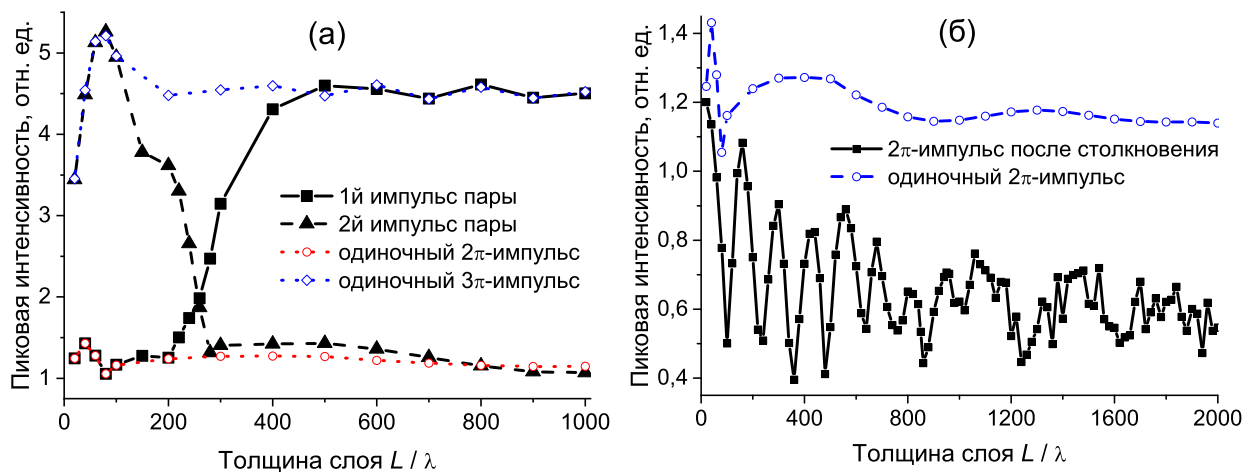
В первой главе исследуется динамика импульсного излучения в резонансных двухуровневых средах – материалах, состоящих из диэлектрической матрицы с включёнными в неё двухуровневыми центрами (атомами, молекулами, квантовыми точками и т.д.). Это одна из базовых моделей нелинейной оптики и лазерной физики, позволившая объяснить многие эффекты взаимодействия света с веществом. В разделе 1.1 приведён краткий обзор современного состояния знаний в этой области, дана классификация режимов взаимодействия (когерентный, некогерентный, квазистационарный) с акцентом на основные изучаемые в главе явления – самоиндуцированную прозрачность, оптические кинки, оптическую бистабильность. В разделе 1.2 сформулированы полуклассические уравнения Максвелла–Блоха для двухуровневой резонансной среды в виде, удобном для проведения численного анализа, – как с использованием

приближения вращающейся волны, так и без него. Выведены выражения для эффективной диэлектрической проницаемости резонансной среды, используемые для оценки её стационарного оптического отклика, и обсуждено влияние диэлектрической матрицы на её свойства, приводящее к возникновению селективного отражения с асимметричной линией Фано. Оставшаяся часть главы содержит результаты анализа распространения оптического излучения в резонансных средах на основе непосредственного численного решения уравнений Максвелла–Блоха, описывающих связанную динамику электромагнитного поля, поляризации среды и разности населённостей энергетических уровней, с использованием метода конечных разностей.

В разделе 1.3 показано, что эффект локального поля, приводящий в плотных резонансных средах к дополнительному (лоренцевскому) сдвигу резонансной частоты, зависит от длительности распространяющегося импульса. Параметром, определяющим проявление этого эффекта, является отношение частоты Раби, соответствующей пику импульса, и лоренцевой частоты, пропорциональной плотности среды (концентрации двухуровневых центров). Для сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов это отношение, как правило, велико, что соответствует режиму обычной самоиндуцированной прозрачности. Для сравнительно длинных (пикосекундных) импульсов поправка на локальное поле начинает играть существенную роль и приводит к эффективному отражению излучения. Таким образом, при анализе распространения сверхкоротких когерентных импульсов, длительность которых t_p много меньше продольного и поперечного времён релаксации среды T_1 и T_2 соответственно ($t_p \ll T_2 < T_1$), эффектом локального поля можно пренебречь; это условие выполняется в большинстве разделов главы.

В разделе 1.4 на основе численного моделирования распространения в резонансной среде когерентных гауссовых импульсов с длительностью t_p порядка нескольких десятков фемтосекунд изучен переходный процесс формирования солитонов самоиндуцированной прозрачности (2π -импульсов). Одним из результатов этого процесса является компрессия импульса, причём, как показано, существует расстояние, на котором импульс испытывает максимальное сжатие (рисунок 1(а)). Проанализированы преобразования спектра излучения в процессе его распространения: результирующий спектр определяется интерференцией колоколообразного спектра основной части (солитона) и спектра «хвоста», имеющего провал на резонансной частоте.

Раздел 1.5 посвящён процессу взаимодействия между двумя импульсами, распространяющимися в резонансной среде в одном направлении. Это возможно благодаря зависимости скорости солитона от интенсивности: более интенсивный импульс распространяется быстрее и способен нагнать в среде



Расчёты для (а) попутно распространяющихся 2π - и 3π -импульсов и (б) встречно распространяющихся 2π -импульсов в сравнении со случаем одиночного импульса

Рисунок 1 – Зависимость пиковой интенсивности прошедшего импульса от толщины слоя резонансной среды при различных геометриях столкновения

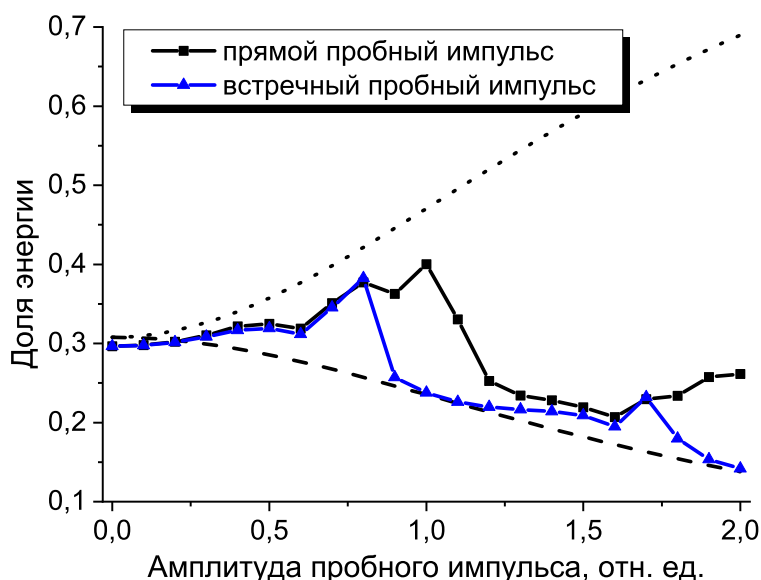
ранее стартовавший менее интенсивный импульс. Взаимодействие попутных импульсов носит упругий характер, типичный для солитонов: при столкновении они не обмениваются энергией между собой и со средой, практически полностью восстанавливая свою форму и пиковую интенсивность после взаимодействия (рисунок 1(а)). Лишь из-за наличия релаксации среды солитоны с расстоянием постепенно затухают.

В отличие от столкновения попутно распространяющихся солитонов, столкновение встречных импульсов, исследованное в разделе 1.6, является неупругим процессом, в результате которого излучение частично поглощается средой. Неупругие взаимодействия дают возможность эффективно контролировать параметры излучения, проходящего через среду. Рассмотрены симметричные и асимметричные столкновения встречных импульсов, различающиеся тем, одинаковые ли импульсы используются и совпадает ли момент их запуска в среду. Неупругий характер симметричных столкновений, сопровождающихся существенным понижением интенсивности 2π -импульсов, продемонстрирован на рисунке 1(б). При асимметричных столкновениях предсказан эффект управляемого поглощения прямого (сигнального) импульса при должном подборе интенсивности встречного (управляющего) импульса. В результате этого процесса резонансная среда локально возбуждается в области столкновения, положением которой можно управлять, подбирая параметры импульсов. Локально возбуждённое состояние среды обладает свойством невзаимности: пробный импульс проходит через среду в одном направлении и поглощается при распространении в обратном направлении, что может служить физической основой оригинальной схемы полностью оптического диода.

Выявлены ограничения предложенной схемы: как показано на рисунке 2, эффект имеет место в определенном диапазоне амплитуд пробного импульса, а количество пробных импульсов, которые могут быть поглощены средой, ограничено явлением насыщения.

В разделе 1.7 изучено влияние неоднородного уширения резонансной линии на переходный процесс формирования солитона самоиндуцированной прозрачности и столкновения встречно распространяющихся импульсов. Неоднородное уширение означает, что двухуровневые центры имеют разные резонансные частоты, распределенные около некоторого среднего значения. Расчёты с использованием гауссовой функции распределения показали, что при наличии неоднородного уширения импульс слабее сжимается в среде. Продемонстрировано существование оптимального уровня неоднородного уширения, при котором неупругость столкновений встречных импульсов выражена наиболее ярко, а доля поглощаемой средой энергии поля достигает максимума.

В разделе 1.8 решено несколько задач, требующих использования уравнений Максвелла–Блоха за рамками известного приближения вращающейся волны (ПВВ). Первая из них касается воздействия на двухуровневую среду импульсов, содержащих менее одного периода колебаний поля (субцикловых импульсов). На рисунке 3 показано, что с увеличением площади таких им-



Доля энергии импульсов, оставшейся в среде, в зависимости от амплитуды пробного импульса. Штриховая и пунктирная линии показывают асимптоты, соответствующие полному поглощению только сигнального импульса и полному поглощению сигнального и пробного импульса соответственно

Рисунок 2 – Асимметричное пропускание пробных импульсов

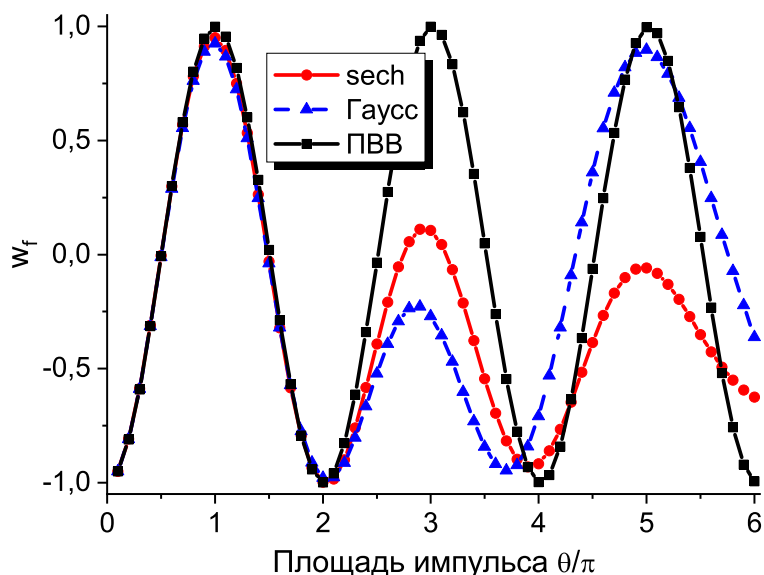
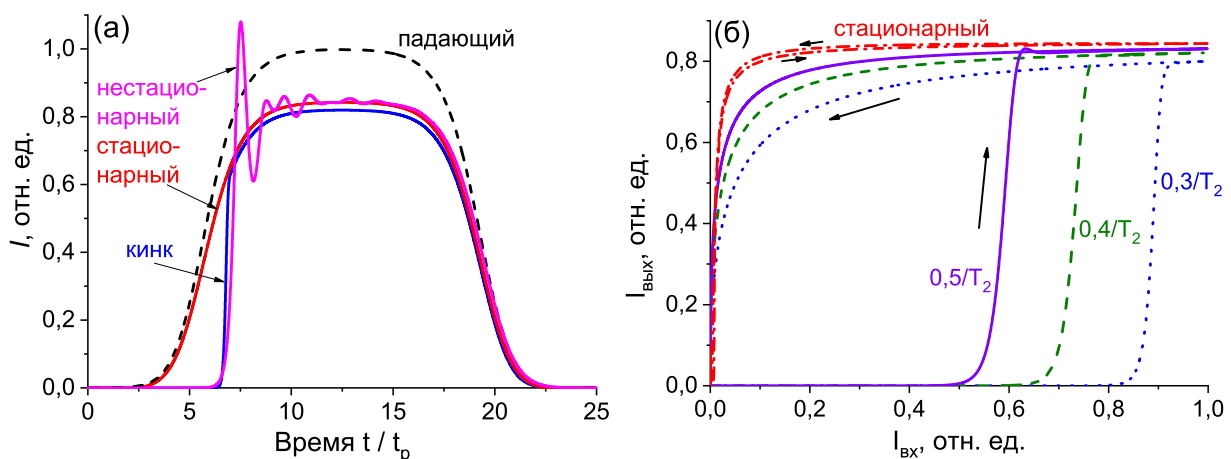


Рисунок 3 – Нарушение теоремы площадей для субцикловых импульсов с огибающими разной формы

пульсов динамика двухуровневой среды всё сильнее отклоняется от диктуемой теоремой площадей: зависимость конечного состояния инверсии (разности населённостей) w_f от площади импульса, полученная в рамках ПВВ, соответствует теореме площадей (периодическая зависимость) в отличие от зависимостей для полуцикловых импульсов с огибающими, описываемыми функцией Гаусса и гиперболическим секансом. Отметим, что зависимость степени отклонения от теоремы площадей от формы огибающей не наблюдается для более длинных импульсов.

Вторая задача, в которой ПВВ не даёт корректного описания взаимодействия излучения со средой, – это распространение в двухуровневой среде линейно-чирпированных импульсов света, мгновенное значение несущей частоты которых меняется со временем по линейному закону. Рассмотрены случаи сравнительно длинных (десятки фемтосекунд) и предельно коротких (одноцикловых) импульсов. Показано, что компрессия одноциклового импульса без чирпа сильнее, чем компрессия чирпированного, тогда как для длинных импульсов справедливо обратное. Продемонстрировано влияние чирпа на результаты столкновений длинных импульсов: наиболее существенно пропускание импульса изменяется, когда лишь один из встречных импульсов является чирпированным. Показано, что столкновения чирпированных одноцикловых импульсов можно использовать для прецизионного управления состоянием среды в малой области пространства. Результаты раздела в целом демонстрируют перспективы использования формы импульса и чирпа как дополнительных степеней свободы для «тонкой настройки» взаимодействия света с веществом.

В разделе 1.9 исследованы эффекты распространения в резонансной двухуровневой среде некогерентных волн с характерным временем изменения огибающей, лежащим между временами релаксации среды ($T_2 \ll t_p \ll T_1$). В этом случае в резонансной среде в результате нелинейного процесса повышения крутизны фронта адиабатически нарастающей падающей волны могут возникать оптические кинки, имеющие вид ударной волны. Численно исследован процесс формирования кинков и подтверждено свойство самоподобия – сохранение формы результирующей волны при масштабировании параметров задачи. Показано, что свойства ударных волн сохраняются и у более общих волновых форм с затухающим задним фронтом, названных кинк-импульсами. Продемонстрирована возможность управления временем прохождения кинка через среду за счёт взаимодействия с встречно распространяющимся кинком или сверхкоротким импульсом с должным образом подобранными параметрами (интенсивность, время запуска, длительность). На основе асимметрии изменения профиля кинк-импульса на переднем и заднем фронтах предложен новый способ реализации оптической квазистабильности, возникающей в квазистационарном режиме взаимодействия излучения со средой. Как показано на рисунке 4, в этом режиме можно наблюдать широкие петли гистерезиса, в отличие от стационарного и нестационарного режимов. В данной схеме, в отличие от безрезонаторной бистабильности на основе диполь-дипольных взаимодействий, не требуется использовать среды с высокими концентрациями резонансных центров.



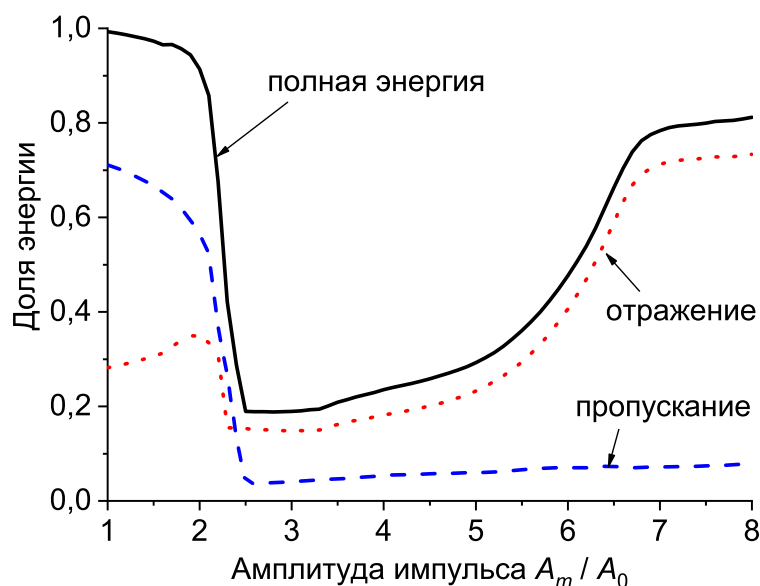
(а) Профили интенсивности прошедшего излучения для различных режимов взаимодействия излучения со средой, (б) соответствующие зависимости выходной интенсивности от входной для различных амплитуд падающей волны E_0 , выраженной в терминах частоты Раби (указана на рисунке)

Рисунок 4 – Оптическая квазистабильность, основанная на формировании кинков в резонансной среде

Во **второй главе** исследовано взаимодействие сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов света с нелинейными одномерными фотонными кристаллами – слоистыми структурами с субволновой периодичностью, состоящими из материалов с показателем преломления, который зависит от интенсивности излучения I . В разделе 2.1 представлено краткое введение в физику фотонных кристаллов, обсуждены основные свойства таких периодических структур, делающие их крайне привлекательными объектами для решения задач нелинейной оптики, отмечена недостаточная изученность эффектов релаксации нелинейности в таких системах. Именно явления, связанные с релаксацией нелинейности – инерционностью (немгновенностью) отклика показателя преломления на изменение интенсивности света, – находятся в центре внимания в данной главе.

В разделе 2.2 сформулированы основные уравнения задачи и численная схема для их решения. Распространение света в одномерном фотонном кристалле описывается волновым уравнением с учётом нелинейной добавки к показателю преломления $\delta n(I, t)$, которая определяется моделью Дебая: $t_{nl} d\delta n/dt + \delta n = n_2 I$, где n_2 – коэффициент кубической (керровской) нелинейности, t_{nl} – время релаксации нелинейности. Совместное численное решение уравнений модели с использованием их конечно-разностной аппроксимации позволило предсказать эффект самозахвата фемтосекундных гауссовых импульсов света в одномерном фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью. Феноменология этого явления, наблюдаемого только при $t_{nl} \neq 0$, состоит в резком падении покидающей структуру энергии излучения, когда амплитуда импульса превышает пороговое значение (рисунок 5). Определён механизм самозахвата, связанный с формированием динамической нелинейной структуры – долгоживущей фотоиндуцированной «ловушки» (связанного состояния электромагнитного поля и нелинейного показателя преломления) – внутри фотонного кристалла. Детальный анализ, проведённый в разделе 2.3, позволил установить оптимальные условия для наблюдения этого эффекта: помимо достаточно сильной нелинейности и достаточно большой длины структуры, сравнимые значения должны иметь характерные времена задачи – длительность импульса и время релаксации нелинейности. Кроме того, самозахват импульса происходит в тех же условиях, в каких возможна его компрессия: если нелинейность фокусирующего типа ($n_2 > 0$), то дисперсия групповой скорости должна быть отрицательной, и наоборот.

В разделе 2.4 изучены трансформации спектрального состава излучения при взаимодействии сверхкороткого импульса с фотонным кристаллом в условиях самозахвата. Наблюдаемые трансформации зависят от интенсивности падающего импульса и эффективности его захвата в структуре и объясняются



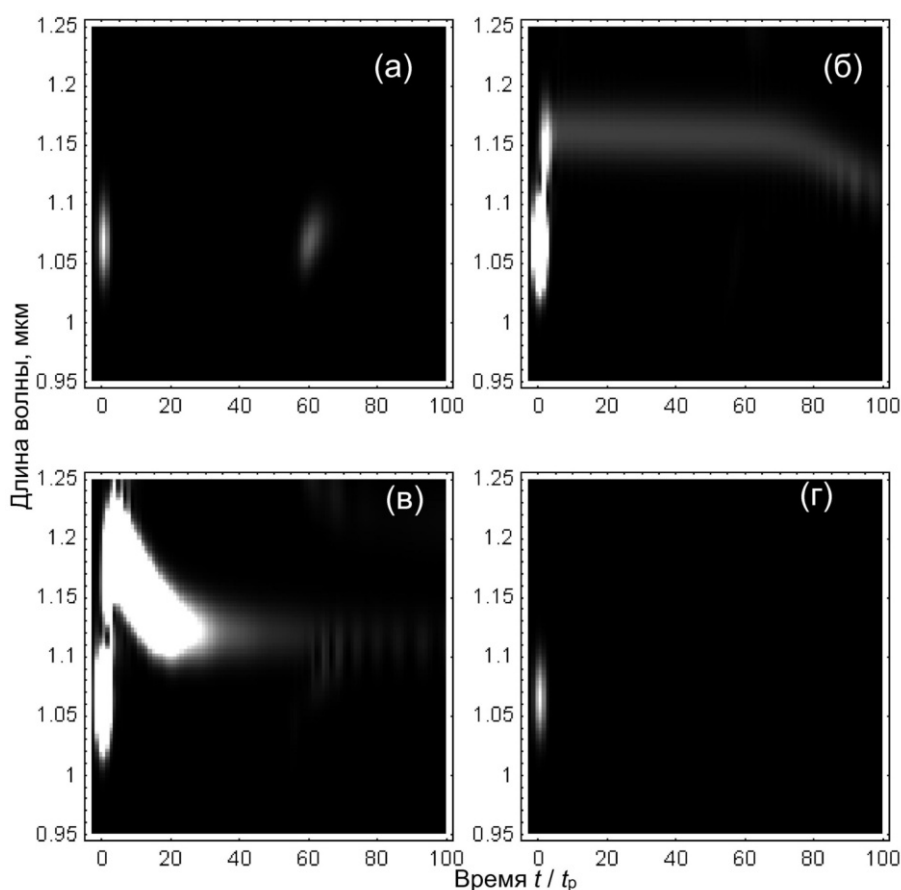
Энергия проинтегрирована за время $t = 200t_p$ после старта гауссова импульса, где $t_p = 30$ фс – его длительность

Рисунок 5 – Феноменология самозахвата: зависимость доли энергии излучения, покинувшей нелинейный фотонный кристалл, от амплитуды импульса

явлением самомодуляции излучения. Получить наглядное представление об изменении спектрального состава излучения во времени можно с помощью спектрограмм, представленных на рисунке 6. По мере увеличения интенсивности импульса он захватывается всё ближе к входной грани фотонного кристалла; в спектре отражённого света наблюдаются сначала узкий пик (квазимонохроматическое излучение, рисунок 6(б)), а затем широкая полоса (излучение типа квазиконтинуума, рисунок 6(в)), которая полностью охватывает частотный диапазон, приходящийся на запрещённую зону. Когда относительно низкоинтенсивный импульс захватывается вблизи выходной грани фотонного кристалла, в спектре прошедшего излучения возникает узкий пик вблизи края запрещённой зоны.

Влияние захваченного в «ловушку» излучения мощного импульса накачки на поведение вторичных (зондирующих) импульсов исследовано в разделе 2.5. Показано, что «ловушка» способна захватить несколько низкоинтенсивных зондирующих импульсов, однако с увеличением их количества меняет своё положение в пространстве и затем разрушается, так что каждый следующий импульс проходит через структуру.

В разделе 2.6 продемонстрирован эффект индуцированного захвата излучения в результате взаимодействия двух низкоинтенсивных импульсов, каждый из которых по отдельности не может сформировать «ловушку». Индуцированный захват возможен для попутных импульсов, распространяющихся с разной скоростью через фотонный кристалл. Для этого использованы дисперсион-

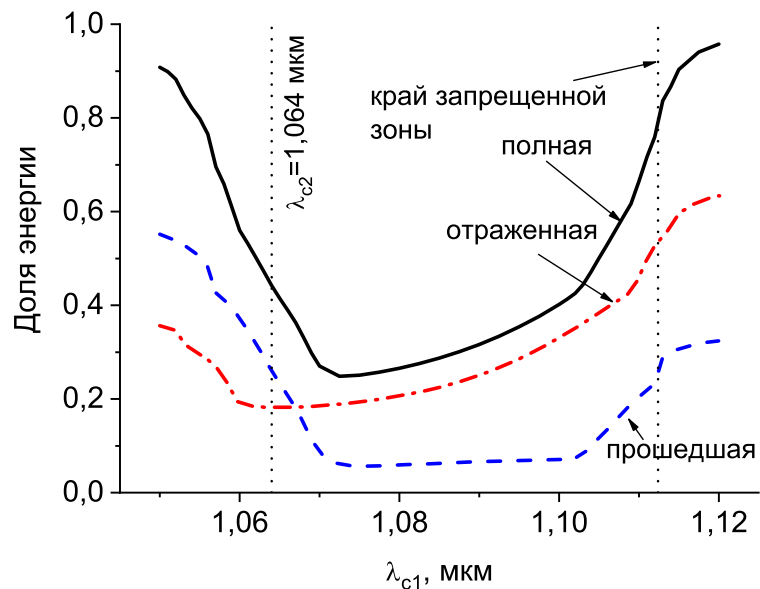


Амплитуда импульса (а) $A_m = A_0$, (б) $A_m = 5A_0$, (в) $A_m = 7A_0$, (г) спектрограмма исходного импульса

Рисунок 6 – Спектрограммы излучения, отражённого от нелинейного фотонного кристалла, при различных значениях амплитуды падающего импульса

ные свойства фотонного кристалла – зависимость от длины волны групповой скорости излучения, уменьшающейся при приближении к запрещённой зоне. Если центральная длина волны и, следовательно, скорости импульсов подобраны таким образом, что второй из них догоняет первый внутри структуры, в области столкновения интенсивность излучения может стать достаточной для формирования «ловушки», а покидающая фотонный кристалл энергия излучения существенно понижается (рисунок 7). В рамках предложенной схемы проанализирована зависимость эффективности индуцированного захвата от интенсивности и временного интервала между импульсами.

В разделе 2.7 предложена идея асимметричного (невзаимного) пропускания света нелинейным фотонным кристаллом, симметрия распределения показателя преломления в котором нарушена вследствие формирования в нём фотоиндуцированной «ловушки». Продемонстрирована зависимость интенсивности проходящего через структуру мощного зондирующего импульса от места локализации «ловушки», определяемой интенсивностью захваченного



Зависимость доли энергии, покинувшей фотонный кристалл, от центральной длины волны первого импульса λ_{c1} . Амплитуда обоих импульсов $A_m = 2A_0$, центральная длина волны второго импульса $\lambda_{c2} = 1,064$ мкм; интервал между импульсами $\Delta t = 5t_p$

Рисунок 7 – Индуцированный захват импульса как функция его центральной длины волны

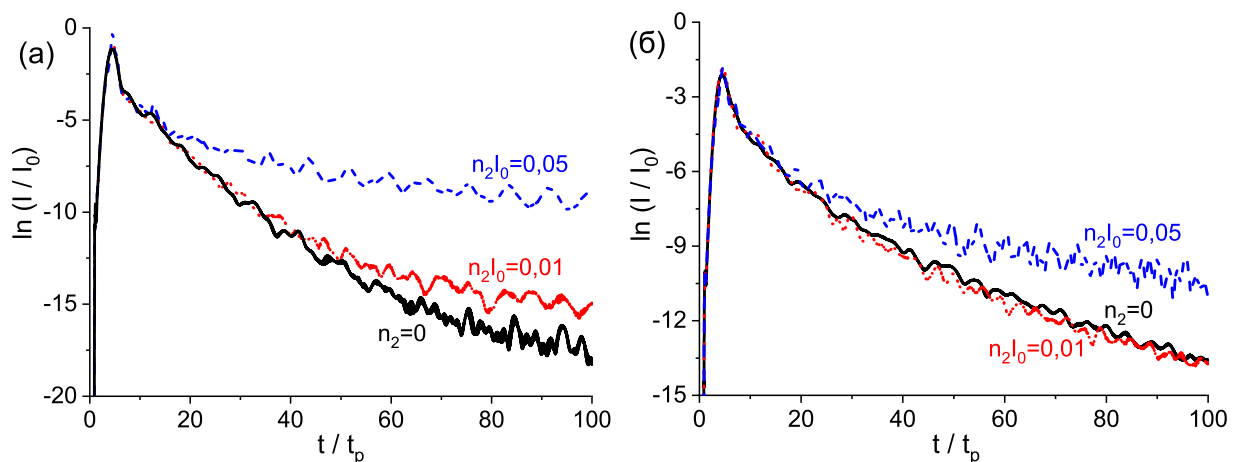
импульса накачки. Показано, что для длинных (квазинепрерывных) зондирующих импульсов асимметрия пропускания проявляется наиболее ярко. Эффект представляет интерес для реализации полностью оптических диодов и других невзаимных систем.

Третья глава посвящена динамике взаимодействия излучения с нелинейными разупорядоченными структурами двух типов, обобщающими системы, которые рассматривались в двух предыдущих главах. При этом использовались те же вычислительные подходы, что и ранее. Раздел 3.1 содержит краткое введение в оптику и фотонику разупорядоченных систем, в котором отмечена принципиальная роль явлений многократного рассеяния и андерсоновской локализации. Обсуждены достижения и нерешённые вопросы нелинейной оптики разупорядоченных структур, а также разупорядоченных структур, содержащих активные (усиливающие) компоненты.

В разделе 3.2 изучены закономерности взаимодействия сверхкоротких импульсов света с одномерными нелинейными фотонными кристаллами, у которых толщины слоёв d меняются случайным образом около средних значений \tilde{d} в соответствии с формулой $d = \tilde{d} + \Delta d(\xi - 1/2)$, где Δd — параметр (амплитуда) беспорядка, ξ — случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне $[0, 1]$. Алгоритм численного моделирования распространения световых импульсов адаптирован для таких структур, позволяя по отклонению динамики затухания излучения от экспоненциальной определять режим взаи-

модействия излучения с системой. В рамках такого подхода исследовано, как сочетаются факторы разупорядоченности и нелинейности, одновременно воздействующие на сверхкороткий импульс света в многослойной структуре, и сделан вывод о конкуренции между ними (рисунок 8). Анализ изменения профилей импульсов показал, что, с одной стороны, беспорядок подавляет нелинейное искажение формы импульса (компрессию, распад), а с другой стороны, вместе с нелинейностью способствует замедлению импульса. Расчёты, проведенные с учётом релаксации нелинейности, подтвердили конкуренцию между факторами нелинейности и беспорядка: влияние релаксации нелинейности на распространение импульса существенно в тех случаях, когда в системе сильная нелинейность и слабый беспорядок или наоборот.

Разупорядоченность структуры оказывает влияние и на эффект самозахвата импульса в фотонном кристалле с инерционной нелинейностью. Показано, что этот эффект сохраняется при достаточно слабом беспорядке и полностью отсутствует при сильном, тогда как при средней степени разупорядоченности возникает максимум пропускания, обусловленный постепенным разрушением фотоиндуцированной «ловушки». Исследовано взаимодействие попутных и встречных импульсов в разупорядоченных нелинейных фотонных кристаллах. Продемонстрирована возможность захвата части энергии при взаимодействии импульсов в таких структурах, что особенно эффективно происходит в схеме с попутными импульсами. Поскольку этот эффект не наблюдается в упорядоченных системах, сделан вывод о предсказании нового явления – индуцированного беспорядком захвата излучения.

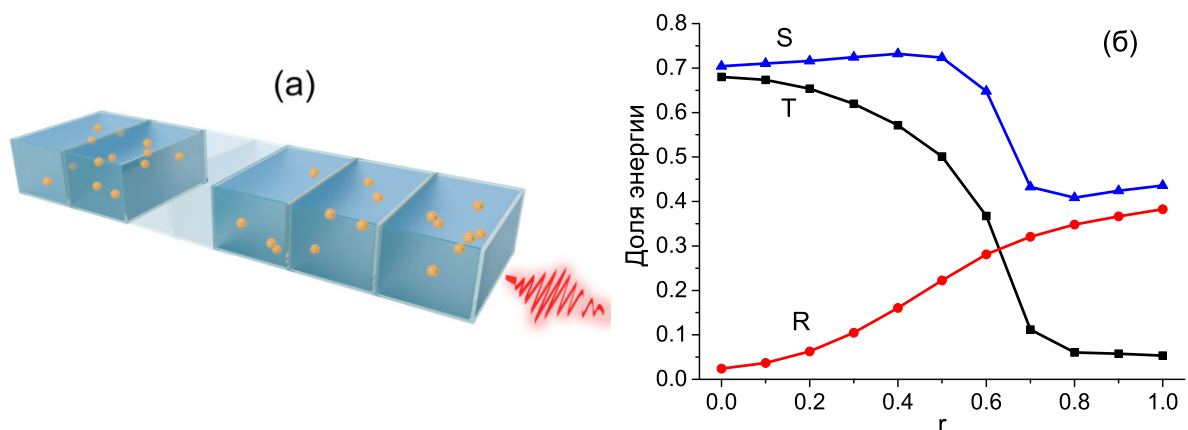


Профили импульсов (в логарифмическом масштабе), прошедших через фотонный кристалл с различными значениями коэффициента нелинейности. Параметр беспорядка: (а) $\Delta d = 0,05$ мкм, (б) $\Delta d = 0,1$ мкм. Усреднение проведено по 25 реализациям

Рисунок 8 – Конкуренция между беспорядком и нелинейностью: чем выше первый, тем слабее влияет вторая

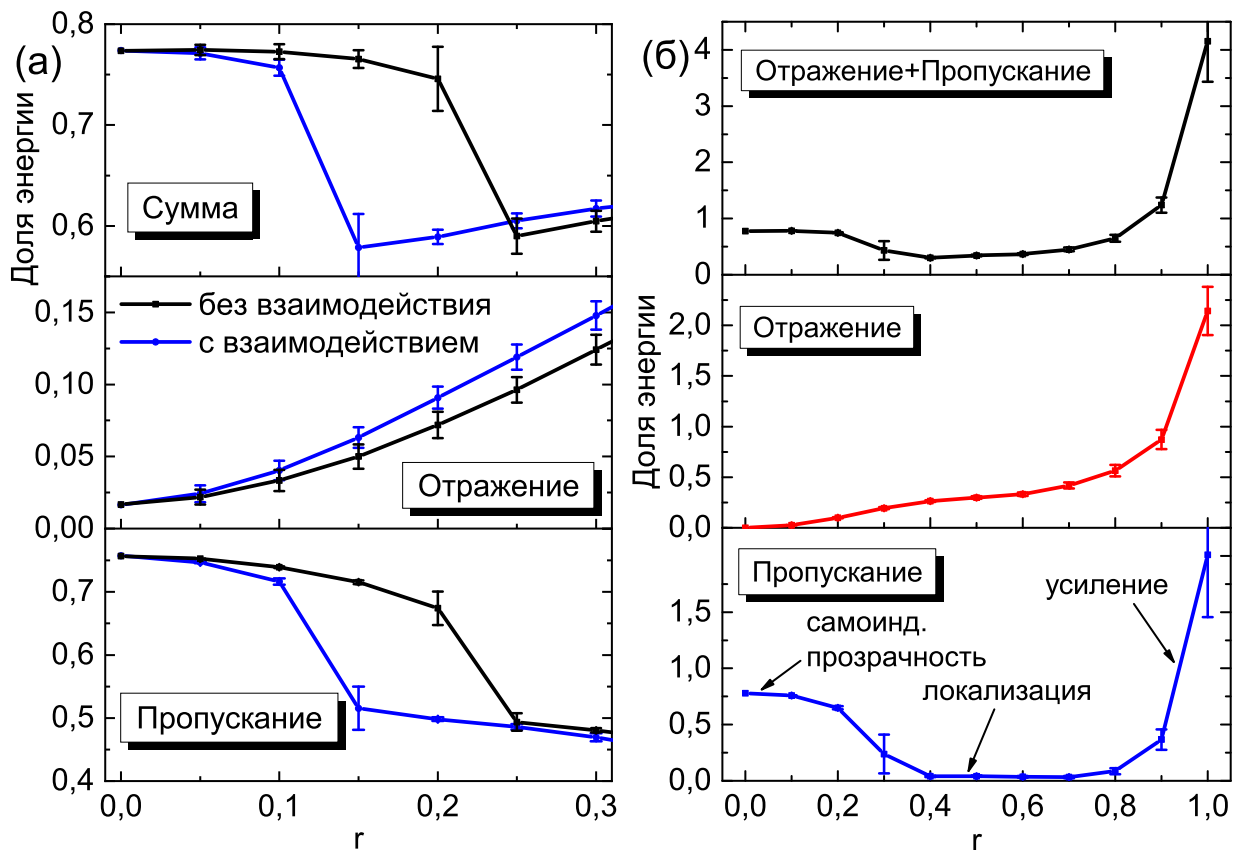
В разделе 3.3 предложена концепция разупорядоченной резонансной среды, параметры которой (концентрация двухуровневых центров, начальная разность населённостей) случайным образом изменяются вдоль направления распространения излучения. С помощью численного решения уравнений Максвелла–Блоха изучена динамика взаимодействия света с такой средой в зависимости от степени её разупорядоченности. Рассмотрена модель со случайным изменением концентрации двухуровневых центров в соответствии с формулой $C(z) = C_0[1 + 2r(\zeta(z) - 1/2)]$, где C_0 – средняя концентрация, r – параметр, определяющий величину беспорядка, $\zeta(z)$ – случайные числа, равномерно распределенные в диапазоне $[0, 1]$. В рамках этой модели выявлен переход от режима самоиндуцированной прозрачности к локализации импульса, носящий пороговый характер, что подтверждается зависимостями доли энергии, покинувшей среду, от степени беспорядка (рисунок 9), средней концентрации частиц, полной толщины системы. Определён диапазон оптимальных для наблюдения локализации значений периода случайных изменений концентрации.

Изучено индуцированное беспорядком неупругое взаимодействие импульсов в резонансной среде. Показано, что взаимодействие попутно распространяющихся импульсов позволяет сдвигать порог локализации и тем самым значительно изменять (модулировать) уровень пропускания излучения (рисунок 10(a)). Выявлено влияние на этот эффект межимпульсного расстояния и показателя преломления диэлектрической матрицы, в которую помещены двухуровневые центры.



(a) Схема рассматриваемой разупорядоченной системы: набор слоев, каждый из которых содержит двухуровневые центры со случайно изменяющейся концентрацией. (б) Доля отражённой (R), прошедшей (T) и полной выходной (S) энергии в зависимости от параметра беспорядка r . Усреднение проведено по 100 реализациям

Рисунок 9 – Переход от самоиндуцированной прозрачности к локализации в разупорядоченной резонансной среде



Поведение доли энергии исходных импульсов, отражённой и прошедшей через среду, в зависимости от параметра беспорядка. (а) Сдвиг порога локализации при взаимодействии попутных импульсов в резонансной среде со случайными вариациями концентрации двухуровневых центров. (б) Режимы взаимодействия импульса с активной резонансной средой со случайными вариациями начальной разности населённостей. Усреднение проведено по 100 реализациям

Рисунок 10 – Режимы взаимодействия импульсов с разупорядоченной резонансной средой

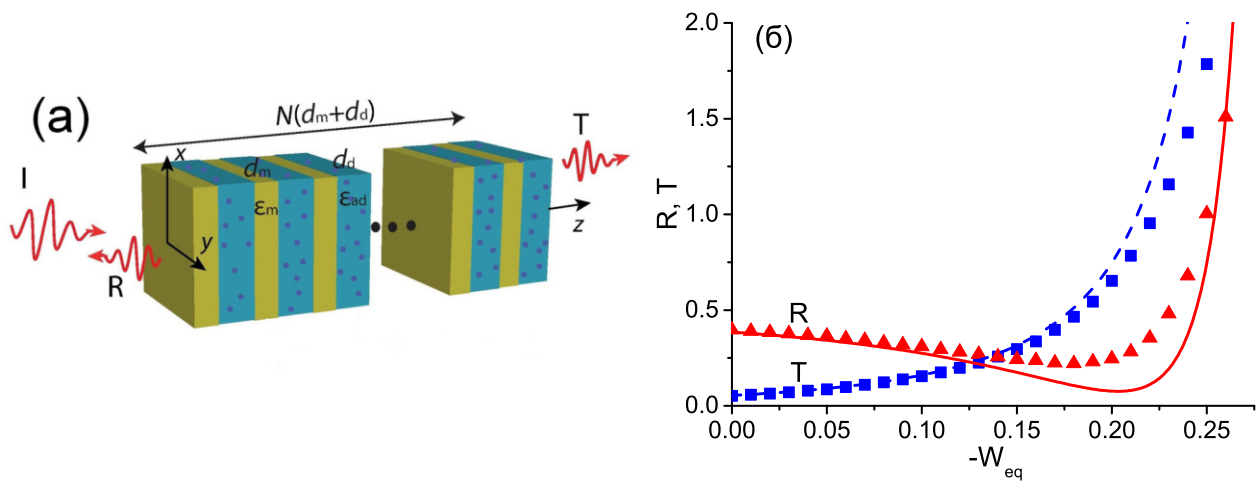
Предложен метод управления сверхкороткими импульсами в активной слоистой структуре на основе резонансных сред со случайными вариациями начальной разности населённостей; в такой системе степень беспорядка можно регулировать изменением мощности внешней накачки, так что при сильном беспорядке возникают слои с инверсией населённости. Обнаружены три режима взаимодействия импульса с такими разупорядоченными структурами (рисунок 10(б)): режим самоиндуцированной прозрачности (слабый беспорядок), режим локализации (умеренный беспорядок) и режим усиления света (сильный беспорядок). Разным режимам соответствуют различные скорости распространения световых сигналов и соотношения между уровнями пропускания и отражения света. Для аналогичной активной слоистой структуры получена зависимость времени прохождения и формы волнового фронта с адиа-

батически и неадиабатически изменяющейся огибающей от степени разупорядоченности, а также продемонстрирована возможность подавления образования кинков в сильно разупорядоченной структуре.

В четвёртой главе исследованы оптические свойства фотонных структур, содержащих активные (усиливающие) компоненты. В разделе 4.1 дан краткий обзор современных тенденций использования активных сред в системах нанофотоники: от компенсации внутренних потерь в метаматериалах и плазмонных структурах, основанных на металлических компонентах, до неэрмитовой фотоники, которая широко использует методы и аналогии, заимствованные из квантовой механики. Проведено обсуждение концептуальных основ неэрмитовой фотоники с акцентом на наиболее популярный объект её исследований – \mathcal{PT} -симметричные структуры; рассмотрены свойства неэрмитовых спектральных вырождений – исключительных точек, обладающих интересными фундаментальными особенностями и находящих применение в различных практических приложениях. Отмечена недостаточная изученность динамики взаимодействия излучения с активными структурами, для чего хорошо подходят развитые в предыдущих главах подходы к описанию резонансных сред.

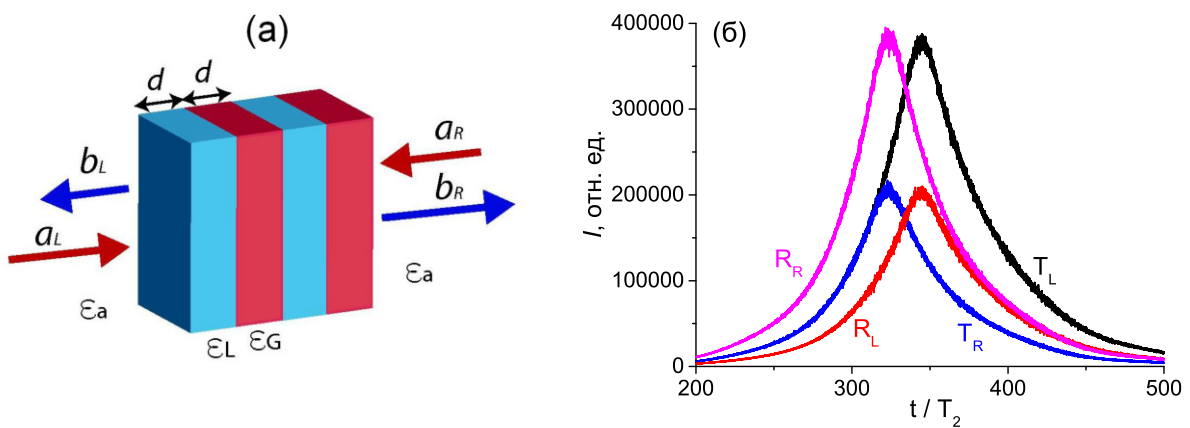
В главе подробно исследованы свойства трёх типов активных структур. В разделе 4.2, используя метод матриц переноса для расчёта стационарных характеристик структур и численное решение уравнений Максвелла–Блоха для расчёта временной динамики, продемонстрирована возможность компенсации внутренних потерь в многослойных системах, состоящих из чередующихся слоёв металла (прозрачного проводящего оксида) и активного (усиливающего) диэлектрика (рисунок 11(а)). Такие структуры в определённом частотном диапазоне могут выступать в качестве гиперболических метаматериалов, перспективных для использования в системах передачи и создания изображений. Для таких приложений важно добиться усиления пропускания и подавления отражения структурой. Выявлены условия усиления пропускания в указанных металлодиэлектрических структурах (рисунок 11(б)) и установлен механизм такого усиления, связанный с возбуждением в активной структуре резонансных мод типа Фабри-Перо. Показано, что при значении коэффициента усиления диэлектрического материала выше порогового отклик на резонансной частоте становится неустойчивым и система переходит в режим квазигенерации, в котором энергия, накопленная в усиливающем материале, высвобождается в виде мощных импульсов излучения.

В разделе 4.3, используя численное решение уравнений Максвелла–Блоха для резонансных сред, изучена динамика распространения света через \mathcal{PT} -симметричные структуры с чередующимися поглощающими и усиливающими слоями (рисунок 12(а)). Данный подход позволяет достоверно описать от-



(а) Схема металлодиэлектрической структуры, состоящей из N периодически чередующихся слоёв металла (проводящего оксида) и активного (усиливающего) диэлектрика. (б) Зависимость стационарного уровня отражения (R) и пропускания (T) от параметра накачки W_{eq} , определяющего величину коэффициента усиления активной среды. Символами показаны результаты численного моделирования, линиями – расчётов матричным методом

Рисунок 11 – Управление резонансным пропусканием и отражением активной металлодиэлектрической структуры



(а) Схема \mathcal{PT} -симметричной многослойной структуры, состоящей из чередующихся слоёв поглощающего и усиливающего материала с диэлектрическими проницаемостями ϵ_L и ϵ_G соответственно; диэлектрическая проницаемость внешней среды $\epsilon_a = 1$. (б) Динамика пропускания и отражения слабой монохроматической волны, падающей на \mathcal{PT} -симметричную структуру, в режиме квазигенерации. $T_{L,R}$ и $R_{L,R}$ – коэффициенты пропускания и отражения для волны, падающей на структуру слева и справа соответственно

Рисунок 12 – Эффект асимметричной направленной генерации излучения

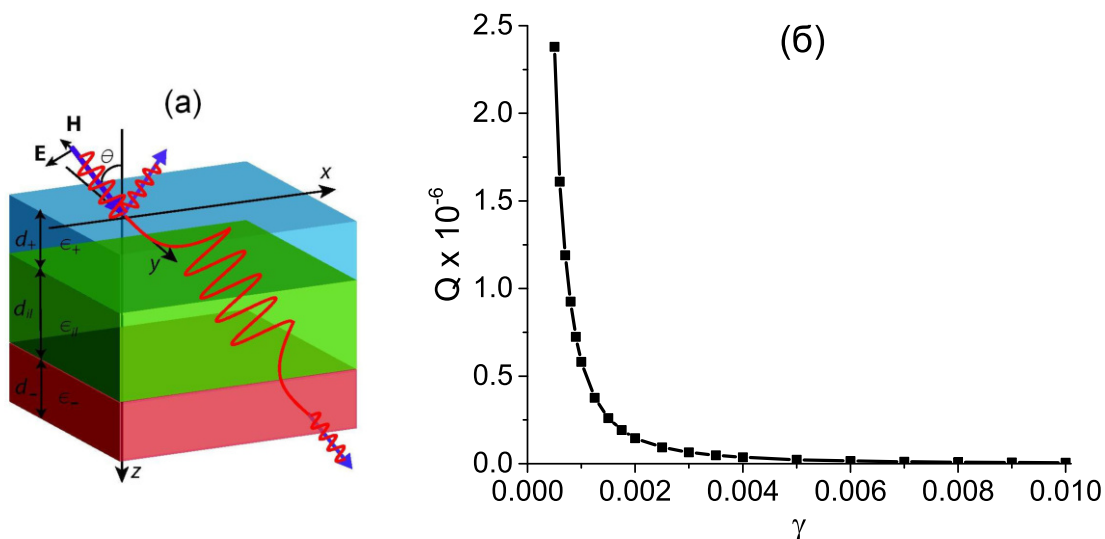
клик структуры вблизи исключительных точек, в которых происходит спонтанное нарушение \mathcal{PT} -симметрии, и учесть нелинейный эффект насыщения, играющий большую роль в поведении системы в фазе с нарушенной симмет-

рией. Проанализирован физический смысл исключительных точек, получаемых при использовании различных форм матрицы рассеяния. Показано, что «истинные» исключительные точки совпадают с анизотропными резонансами пропускания, тогда как «альтернативные» исключительные точки указывают на переход системы в режим квазигенерации. В последнем многослойная \mathcal{PT} -симметричная система высвобождает энергию в виде мощных импульсов, асимметрично испускаемых в прямом и обратном направлениях. При этом интенсивность излучения, генерируемого в данном направлении, не зависит от направления распространения исходной волны (рисунок 12(б)). Этот эффект асимметричной направленной генерации импульсов обусловлен нарушением \mathcal{PT} -симметрии и влиянием насыщающейся нелинейности, которая приводит к необратимости нарушения симметрии и невзаимности пропускания.

Одним из наиболее известных явлений неэрмитовой фотоники является эффект лазера-поглотителя, при котором \mathcal{PT} -симметричная многослойная структура выступает в качестве усилителя или идеального поглотителя излучения в зависимости от разности фаз между двумя когерентными возбуждающими волнами. Определены оптимальные условия для наблюдения этого эффекта и показано, что максимальный контраст между режимами поглотителя и усилителя достигается выше исключительной точки, но ниже порога квазигенерации. Выше этого порога характеристики генерируемого излучения не зависят от разности фаз падающих волн.

Проанализирована применимость теории эффективной среды к анализу \mathcal{PT} -симметричных многослойных систем со слоями малой толщины. Показано, что локальные эффективные параметры такого метаматериала (приближение Максвелла-Гарнетта) не могут использоваться для предсказания положения исключительных точек, тогда как приближение нелокальной бианизотропной эффективной среды даёт надёжные результаты при нормальном падении излучения, если толщина элементарной ячейки много меньше длины волны излучения. При наклонном падении волн нелокальное приближение сохраняет применимость, если мнимая часть диэлектрической проницаемости не превышает действительную часть.

В разделе 4.4, используя метод матриц переноса, исследованы свойства квазисвязанных состояний в континууме (высокодобротных локализованных мод) в неэрмитовых трёхслойных структурах с боковыми слоями, состоящими из поглощающих и усиливающих материалов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью (рисунок 13(а)). Предложен новый механизм возбуждения квазисвязанных состояний в континууме, обусловленный нарушением \mathcal{PT} -симметрии в таких структурах. Формальной основой механизма является совпадение сингулярной точки фазовой диаграммы структуры с положением



(а) Схема \mathcal{PT} -симметричной трёхслойной структуры, на которую под углом падает ТМ-поляризованная волна. (б) Поведение добротности резонансов как функция коэффициента поглощения и усиления, $Q \sim \gamma^{-2}$

Рисунок 13 – Добротность резонансов типа квазисвязанного состояния в континууме, возбуждаемых при нарушении \mathcal{PT} -симметрии

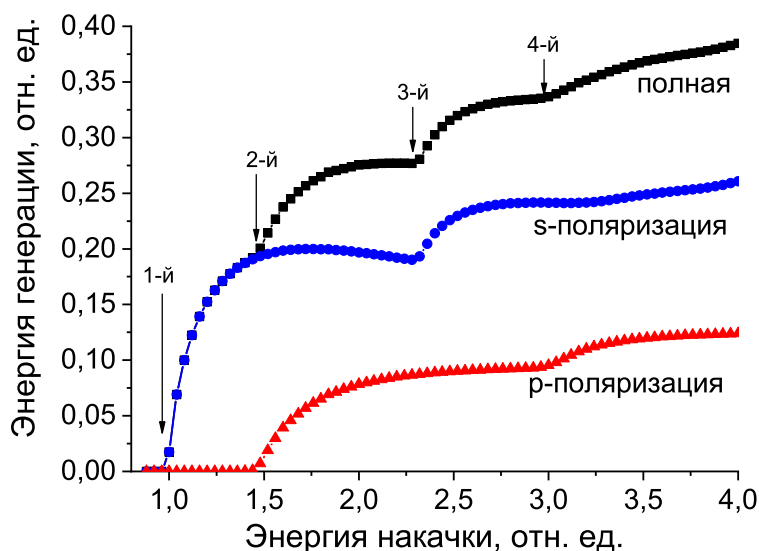
связанных состояний в континууме на частоте, на которой диэлектрическая проницаемость боковых слоёв обращается в нуль. В результате в спектрах отражения и пропускания структуры возникают резонансы, ширина которых (а следовательно, и добротность) определяется величиной коэффициента поглощения и усиления материалов (рисунок 13(б)).

Исследовано влияние геометрической и неэрмитовой асимметрии на отклик указанной трёхслойной неэрмитовой системы, поддерживающей квазисвязанные состояния в континууме. Показано, что в асимметричной структуре возникает режим лазера-поглотителя, ассоциированный со связанным состоянием в континууме, а в системе с неэрмитовой асимметрией можно наблюдать контринтуитивный отклик типа генерации, вызванной потерями. Определены топологические характеристики резонансов симметричной и асимметричной трёхслойной неэрмитовой системы: топологический заряд квазисвязанного состояния в континууме равен 1, а резонанса Фано – 0, что говорит об их принципиальном различии. Ненулевое значение топологического заряда сохраняется и в асимметричной структуре при наблюдении эффекта лазера-поглотителя.

Построена основанная на концепции связанных осцилляторов теоретическая модель неэрмитовой диэлектрической метаповерхности с элементарной ячейкой, включающей две нанополоски. Показано, что добротностью резонанса типа квазисвязанного состояния в континууме в такой системе можно управлять, компенсируя геометрическую асимметрию нанополосок с помощью

подбора значений коэффициентов поглощения и усиления. Продемонстрирована возможность возбуждения локализованной моды со сколь угодно высокой добротностью в такой неэрмитовой системе.

Пятая глава посвящена развитию теории РОС-лазеров на светоиндуцированных поляризационных решётках (решётках дихроизма усиления). В разделе 5.1 представлены основные литературные сведения о таких лазерах, отличающихся от стандартных РОС-лазеров схемой возбуждения, в которой используются два пучка накачки ортогональной поляризации. В разделе 5.2 построена минимальная теоретическая модель такого РОС-лазера, основанная на балансных уравнениях для концентрации возбуждённых молекул и плотности фотонов генерации. В модели рассматривается динамика величин, усреднённых по длине решётки возбуждения, с учётом поляризации генерируемого излучения и пространственного распределения возбуждённых молекул различных ориентаций, которое обуславливает возникновение решёток коэффициента усиления. Как показано в разделе 5.3, численное решение уравнений модели позволяет построить зависимость энергии генерации от энергии накачки, которая содержит характерные особенности (перегибы), отмечающие порог генерации следующего лазерного импульса (рисунок 14). Развитие генерации во времени прослежено на типичных примерах, для которых получены профили лазерных импульсов и динамика концентрации возбуждённых молекул. Результаты расчётов находятся в хорошем качественном соответствии с данными экспериментальных измерений.



Стрелки указывают значения накачки, при которых начинается генерация очередного импульса

Рисунок 14 – Теоретическая зависимость энергии генерации РОС-лазера на поляризационных решётках от энергии накачки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана и реализована схема численного моделирования распространения сверхкоротких (когерентных) импульсов света через резонансные двухуровневые среды, основанная на полуклассических уравнениях Максвелла–Блоха для различных вариантов задачи – в рамках [6] и за пределами [11] приближения вращающейся волны, с учётом неоднородного уширения резонансной линии [13], с учётом фактора локального поля, обусловленного диэлектрической матрицей [4, 5]. Рассчитана динамика формирования солитонов самоиндуцированной прозрачности, характеризуемая компрессией импульсов и интерференционными эффектами в их спектрах [6], причём при рассмотрении достаточно коротких (фемтосекундных) импульсов влияние диполь-дипольных взаимодействий между двухуровневыми центрами можно не учитывать [3]. Проанализированы закономерности взаимодействия попутных и встречных импульсов в резонансной среде [6]. Показано, что неупругий характер взаимодействия встречных оптических импульсов, при котором происходит обмен энергией между ними и с резонансной средой, можно использовать для управления пропусканием импульса, позволяющего добиться его полного управляемого поглощения [8]. В результате поглощения импульса среда становится невзаимной: прохождение излучения через неё начинает сильно зависеть от направления распространения [8]. Установлено, что существует оптимальный уровень неоднородного уширения, при котором управляемое поглощение и другие эффекты энергообмена при взаимодействии оптических импульсов проявляются наиболее ярко [13]. Найдены условия оптимальной компрессии и наиболее эффективного управления пропусканием импульса при учёте линейного изменения частоты излучения (чирпа) [16, 40]. Показано, что нарушение теоремы площадей при распространении предельно коротких (субцикловых) импульсов зависит от формы их огибающей [11, 37]. Установлены закономерности формирования и взаимодействия кинков (ударных волн) в резонансных средах. Продемонстрирована возможность управления скоростью распространения таких волн в широких пределах при взаимодействии с встречным кинком [18]. Предложена схема оптической квазистабильности, основанная на формировании в среде кинк-импульсов с асимметричным профилем [26].

2. Методами численного моделирования детально исследован механизм и условия наблюдения эффекта самозахвата сверхкороткого импульса света в одномерном фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью [2, 9, 33, 34]. Формирование при этом фотоиндуцированной «ловушки» (свя-

занного состояния электромагнитного поля и распределения показателя преломления) позволяет объяснить изменение спектрального состава излучения, включая формирование узких пиков и широких полос типа квазиконтинуума в запрещённой зоне структуры [7], и асимметричное (невзаимное) распространение вторичных импульсов через такую структуру [10, 36]. Изучена устойчивость «ловушки» к возмущению зондирующими импульсами разной интенсивности [12]. Показано, что возможен индуцированный захват излучения в схеме с попутно распространяющимися низкоинтенсивными импульсами, каждый из которых по отдельности не испытывает самозахвата в фотонном кристалле [12, 35].

3. Изучено влияние равномерно распределённых случайных вариаций толщины слоёв на взаимодействие сверхкоротких импульсов света с одномерными нелинейными фотонными кристаллами, в том числе с учётом релаксации нелинейности. Показано, что разупорядоченность и нелинейность в данной системе являются конкурирующими факторами, о чём можно судить по изменению профилей и динамике локализации импульсов [14, 38, 39, 53]. Проанализирован процесс подавления эффекта самозахвата импульса с увеличением степени разупорядоченности фотонного кристалла, что приводит к возникновению максимума пропускания структуры при промежуточных уровнях беспорядка [14]. Предсказано явление индуцированного беспорядком захвата излучения при взаимодействии попутных и встречных импульсов в разупорядоченных нелинейных фотонных кристаллах [15].

4. Предложена концепция разупорядоченной резонансной среды, параметры которой случайным образом изменяются вдоль направления распространения излучения, и продемонстрирован имеющий пороговую природу переход от режима самоиндуцированной прозрачности к локализации сверхкороткого импульса в такой среде [20, 47, 55]. Показана возможность управлять положением порога локализации и модулировать пропускание излучения при взаимодействии попутно распространяющихся импульсов [22, 49]. Выявлены режимы взаимодействия импульса (самоиндуцированная прозрачность, локализация, усиление) с активными разупорядоченными структурами на основе резонансных сред, что позволяет изменять в широких пределах уровень пропускания и скорость распространения излучения [25]. Для волновых фронтов продемонстрирована зависимость времени прохождения и формы результирующей огибающей от степени разупорядоченности активной резонансной среды, позволяющая в том числе полностью подавлять формирование кинков в сильно разупорядоченной структуре [28].

5. На основе численных расчётов с использованием уравнений Максвелла-Блоха продемонстрирована возможность компенсации внутренних потерь (по-

глощения) в многослойных металлодиэлектрических системах, содержащих резонансно усиливающую среду. Определены условия резонансного усиления пропускания и подавления отражения в данной структуре при увеличении коэффициента усиления, а также закономерности её перехода в неустойчивый режим квазигенерации с испусканием мощного импульсного излучения [19, 46].

6. Теоретически изучены свойства слоистых \mathcal{PT} -симметричных структур с резонансным поглощением и усилением, связанные с возникновением в их параметрическом пространстве исключительных точек. Выяснен физический смысл этих точек для различных форм матрицы рассеяния системы и установлена их связь с порогом квазигенерации [1, 27, 52]. Выше этого порога обнаружен эффект асимметричной направленной генерации импульсов, обусловленный нарушением \mathcal{PT} -симметрии в многослойной структуре с насыщающейся нелинейностью [21, 48, 50, 54]. Показано, что оптимальные условия для получения эффекта лазера-поглотителя в \mathcal{PT} -симметричной многослойной структуре достигаются выше исключительной точки, но ниже порога квазигенерации [24, 52]. Установлены границы применимости нелокальной теории эффективной среды к определению положения исключительных точек в \mathcal{PT} -симметричных многослойных метаматериалах [23, 51].

7. Обнаружен новый механизм возбуждения высокочастотных резонансных мод типа квазисвязанного состояния в континууме, обусловленный нарушением \mathcal{PT} -симметрии в трёхслойных структурах с боковыми слоями, состоящими из поглощающих и усиливающих материалов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью [29]. Показано, что введение асимметрии в структуры такого типа приводит к возникновению высокочастотного режима лазера-поглотителя, ассоциированного со связанным состоянием в континууме [30]. Продемонстрирована топологическая нетривиальность предсказанных симметричных резонансов типа квазисвязанного состояния в континууме, в отличие от обычных резонансов Фано, наблюдаемых на других частотах [32]. Универсальность предложенного подхода подтверждается наблюдением похожих закономерностей для высокочастотных резонансов в неэрмитовых метаповерхностях, для которых в рамках модели связанных осцилляторов предсказана компенсация влияния геометрической асимметрии за счёт подбора коэффициентов поглощения и усиления материалов [31].

8. Разработана теоретическая модель РОС-лазера на светоиндуцированных поляризационных решётках, основанная на модификации балансных уравнений для концентрации возбуждённых молекул и плотности фотонов генерации с целью учёта поляризации генерируемого излучения и пространственного распределения возбуждённых молекул различных ориентаций. Показано, что

модель позволяет рассчитывать энергетические (зависимость энергии генерации от энергии накачки) и динамические (временные профили генерируемых импульсов) характеристики указанного лазера в хорошем полуколичественном согласии с экспериментальными данными [17, 41, 42, 43, 45]. Проведено сравнение разработанной модели с микроскопической полуклассической теорией РОС-лазера на поляризационных решётках [44, 45], которая даёт качественно аналогичные результаты, но менее удобна в использовании.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Реализованные при выполнении диссертационной работы методики расчёта взаимодействия электромагнитного излучения с нелинейными средами, фотонными кристаллами, метаматериалами представляют значительный интерес для предсказания и исследования свойств новых структурированных материалов, разработки компонент активной нанофотоники для генерации, управления и преобразования оптических сигналов, оптимизации параметров разнообразных устройств на их основе. Перечислим некоторые направления, в рамках которых могут найти практическое использование конкретные результаты, полученные в диссертации:

- *Управление светом с помощью света.* Эффекты управляемого поглощения и асимметричного (невзаимного) пропускания импульсов света, исследованные в главе 1, могут стать теоретической основой для разработки поглотителей, ограничителей, полностью оптических диодов, логических элементов и других компонент нелинейной оптики. Для оптической логики представляет интерес бистабильный переключатель на основе кинков, описанный в разделе 1.9.3. Для управления оптическими сигналами и трансформации их спектрального состава перспективны результаты главы 2, связанные с локализацией и взаимодействием (асимметричное прохождение, индуцированный захват) сверхкоротких импульсов света в фотонных кристаллах.
- *Разупорядоченные оптические структуры.* Результаты, полученные в главе 3, могут найти применение для оценки влияния разупорядоченности на поведение нелинейно-оптических устройств, а также для создания систем с регулируемым излучением беспорядком. Смещение порога локализации вследствие неупругих взаимодействий импульсов в разупорядоченной резонансной среде, описанное в разделе 3.3.2, может использоваться для модуляции оптических сигналов.
- *Метаматериалы.* Компенсация потерь и переключение между режимами с преимущественным отражением и пропусканием, обнаруженные в

разделе 4.2, расширяют возможности практического использования металлодиэлектрических структур типа гиперболических метаматериалов в системах создания оптических изображений.

- *Компоненты активной фотоники.* Полученные в главе 4 результаты могут найти практическое использование при создании оптических и оптоэлектронных устройств нового поколения, в которых активные среды применяются для динамической перестройки оптического отклика. В частности, эффект асимметричной направленной генерации импульсов света может стать основой полностью оптических диодов и транзисторов, а также новых типов лазеров, обладающих сильной асимметрией генерации. Высокодобротные резонансы типа квазисвязанного состояния в континууме, механизм возбуждения которых описан в разделе 4.4, представляют интерес в ситуациях, когда необходима сильная концентрация излучения внутри структуры: для понижения порога генерации лазерных систем, усиления нелинейно-оптических эффектов и т.д. Узкие резонансы такого типа также привлекательны в наносенсорике в силу чувствительности их положения и ширины к изменению условий, в которых находится система.
- *Лазеры.* Разработанная в главе 5 теоретическая модель может использоваться при создании новых РОС-лазеров на красителях, позволяющих стабильно генерировать одиночные пикосекундные импульсы поляризованного света, а также для получения реалистических оценок параметров таких лазеров и формулировки рекомендаций по их выбору. Результаты главы 4 перспективны в качестве физической основы нанолазерных систем нового типа (лазеры-поглотители, направленная генерация и т.д.).

Результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе на кафедре физической оптики и прикладной информатики Белорусского государственного университета и в научной работе лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института (акты о практическом использовании представлены в ПРИЛОЖЕНИИ Б диссертации).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Глава в коллективной монографии:

1. Novitsky D. V., Novitsky A. V. Exceptional points // All-Dielectric Nanophotonics / ed. A. S. Shalin, A. Canós Valero, A. Miroshnichenko. — Amsterdam: Elsevier, 2024. — P. 213–242. — URL: <https://shop.elsevier.com/books/all-dielectric-nanophotonics/shalin/978-0-323-95195-1> (дата обращения 01.11.2023).

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

2. Novitsky D. V. Pulse trapping inside a one-dimensional photonic crystal with relaxing cubic nonlinearity // Physical Review A. — 2010. — Vol. 81, № 5. — P. 053814(1)–053814(7).
3. Novitsky D. V. Local field effect as a function of pulse duration // Physical Review A. — 2010. — Vol. 82, № 1. — P. 015802(1)–015802(4).
4. Novitsky D. V. Influence of an absorbing dielectric background on bistable response of a dense collection of two-level atoms // Journal of the Optical Society of America B. — 2011. — Vol. 28, № 1. — P. 18–22.
5. Novitsky D. V. Asymmetric resonance in selective reflection: explanation via Fano-like mechanism // Optics Letters — 2011. — Vol. 36, № 11. — P. 2002–2004.
6. Novitsky D. V. Femtosecond pulses in a dense two-level medium: Spectral transformations, transient processes, and collisional dynamics // Physical Review A. — 2011. — Vol. 84, № 1. — P. 013817(1)–013817(9).
7. Novitsky D. V. Spectral transformations in the regime of pulse self-trapping in a nonlinear photonic crystal // Physical Review A. — 2011. — Vol. 84, № 5. — P. 053857(1)–053857(6).
8. Novitsky D. V. Controlled absorption and all-optical diode action due to collisions of self-induced-transparency solitons // Physical Review A. — 2012. — Vol. 85, № 4. — P. 043813(1)–043813(7).
9. Novitsky D. V. Search for the optimal parameters of relaxing nonlinearity to obtain self-trapping of an ultrashort pulse in a photonic crystal // Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. — 2012. — Vol. 21, № 1. — P. 1250010(1)–1250010(12).
10. Novitsky D. V. Asymmetric light transmission through a photonic crystal with relaxing Kerr nonlinearity // EPL. — 2012. — Vol. 99, № 4. — P. 44001(1)–44001(6).
11. Novitsky D. V. Propagation of subcycle pulses in a two-level medium: Area-theorem breakdown and pulse shape // Physical Review A. — 2012. — Vol. 86, № 6. — P. 063835(1)–063835(5).

12. Novitsky D. V. Effects of pulse collisions in a multilayer system with noninstantaneous cubic nonlinearity // *Journal of Optics*. — 2013. — Vol. 15, № 3. — P. 035206(1)–035206(10).
13. Novitsky D. V. Ultrashort pulses in an inhomogeneously broadened two-level medium: soliton formation and inelastic collisions // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2014. — Vol. 47, № 9. — P. 095401(1)–095401(7).
14. Novitsky D. V. Pulse propagation in one-dimensional disordered photonic crystals: interplay of disorder with instantaneous and relaxing nonlinearities // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2014. — Vol. 31, № 6. — P. 1282–1289.
15. Novitsky D. V. Disorder-induced light trapping enhanced by pulse collisions in one-dimensional nonlinear photonic crystals // *Optics Communications*. — 2015. — Vol. 353. — P. 56–62.
16. Novitsky D. V. Compression and collisions of chirped pulses in a dense two-level medium // *Optics Communications*. — 2016. — Vol. 358. — P. 202–207.
17. Novitsky D. V., Katarkevich V. M., Efendiev T. Sh. Dynamics of DFB dye lasing by polarization modulation: simulations and experiment // *Laser Physics Letters*. — 2016. — Vol. 13, № 2. — P. 025002(1)–025002(8).
18. Novitsky D. V. Optical kinks and kink-kink and kink-pulse interactions in resonant two-level media // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 95, № 5. — P. 053846(1)–053846(8).
19. Novitsky D. V., Tuz V. R., Prosvirnin S. L., Lavrinenko A. V., Novitsky A. V. Transmission enhancement in loss-gain multilayers by resonant suppression of reflection // *Physical Review B*. — 2017. — Vol. 96, № 23. — P. 235129(1)–235129(10).
20. Novitsky D. V. Disordered resonant media: Self-induced transparency versus light localization // *Physical Review A*. — 2018. — Vol. 97, № 1. — P. 013826(1)–013826(6).
21. Novitsky D. V., Karabchevsky A., Lavrinenko A. V., Shalin A. S., Novitsky A. V. PT symmetry breaking in multilayers with resonant loss and gain locks light propagation direction // *Physical Review B*. — 2018. — Vol. 98, № 12. — P. 125102(1)–125102(8).
22. Novitsky D. V., Shalin A. S. All-optical transmission modulation due to inelastic interactions of ultrashort pulses in a disordered resonant medium // *Annalen der Physik*. — 2019. — Vol. 531, № 2. — P. 1800405(1)–1800405(8).
23. Novitsky D. V., Shalin A. S., Novitsky A. V. Nonlocal homogenization of PT-symmetric multilayered structures // *Physical Review A*. — 2019. — Vol. 99, № 4. — P. 043812(1)–043812(7).

24. Novitsky D. V. CPA-laser effect and exceptional points in PT-symmetric multilayer structures // *Journal of Optics*. — 2019. — Vol. 21, № 8. — P. 085101(1)–085101(7).
25. Novitsky D. V., Redka D., Shalin A. S. Different regimes of ultrashort pulse propagation in disordered layered media with resonant loss and gain // *Annalen der Physik*. — 2019. — Vol. 531, № 9. — P. 1900080(1)–1900080(7).
26. Novitsky D. V., Shalin A. S. Kink-based mirrorless quasi-bistability in resonantly absorbing media // *Optics Letters*. — 2020. — Vol. 45, № 1. — P. 137–140.
27. Novitsky A., Lyakhov D., Michels D., Pavlov A. A., Shalin A. S., Novitsky D. V. Unambiguous scattering matrix for non-Hermitian systems // *Physical Review A*. — 2020. — Vol. 101, № 4. — P. 043834(1)–043834(7).
28. Novitsky D. V., Lyakhov D., Michels D., Redka D., Pavlov A. A., Shalin A. S. Controlling wave fronts with tunable disordered non-Hermitian multilayers // *Scientific Reports*. — 2021. — Vol. 11. — P. 4790(1)–4790(8).
29. Novitsky D. V., Shalin A. S., Redka D., Bobrovs V., Novitsky A. V. Quasibound states in the continuum induced by PT symmetry breaking // *Physical Review B*. — 2021. — Vol. 104, № 8. — P. 085126(1)–085126(12).
30. Novitsky D. V., Canós Valero A., Krotov A., Salgals T., Shalin A. S., Novitsky A. V. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-Hermitian structures // *ACS Photonics*. — 2022. — Vol. 9, № 9. — P. 3035–3042.
31. Hlushchenko A. V., Novitsky D. V., Tuz V. R. Trapped-mode excitation in all-dielectric metamaterials with loss and gain // *Physical Review B*. — 2022. — Vol. 106, № 15. — P. 155429(1)–155429(9).
32. Novitsky D. V., Novitsky A. V. Bound states in the continuum versus Fano resonances: Topological argument // *Photonics*. — 2022. — Vol. 9, № 11. — P. 880(1)–880(8).

Статьи в материалах научных конференций:

33. Новицкий Д. В. Локализация энергии фемтосекундного импульса в фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью // *Современные проблемы физики: сб. науч. тр. IV Межд. школы-конф. мол. уч. и спец., Минск, 9-11 июня 2010 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. В. В. Машко, В. З. Зубелевича, А. В. Буценя*. — Мн., 2010. — С. 88–91.
34. Новицкий Д. В. Захват фемтосекундного импульса света в одномерном фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью // *Лазерная физика и оптические технологии: Сб. науч. тр. VIII Межд. науч.*

- конф., Минск, 27-30 сентября 2010 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. В. А. Орловича [и др.] — Мн., 2010. — Т. 2. — С. 72–75.
35. Новицкий Д. В. Локализация излучения в результате столкновения импульсов в фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью // Лазерная физика и оптические технологии: Сб. науч. тр. IX Межд. науч. конф., Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: С. А. Маскевич [и др.] — Гродно, 2012. — Ч. 1. — С. 236–239.
36. Новицкий Д. В. Асимметричное пропускание света в режиме самозахвата импульса в фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью // Современные проблемы физики: сб. науч. тр. V Межд. школы-конф. мол. уч. и спец., Минск, 13-15 июня 2012 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. В. В. Машко [и др.] — Мн., 2012. — С. 8–12.
37. Новицкий Д. В. Влияние формы огибающей субпериодического импульса света на динамику двухуровневой среды // IV Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 24-26 апреля 2013 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Ковчег, 2013. — С. 147–148.
38. Новицкий Д. В. Сверхкороткие импульсы света в нелинейных разупорядоченных многослойных структурах // Современные проблемы физики: сб. науч. тр. VI Межд. школы-конф. мол. уч. и спец., Минск, 11-13 июня 2014 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. В. В. Машко [и др.] — Мн., 2014. — С. 238–242.
39. Новицкий Д. В. Динамика импульсов света в нелинейных разупорядоченных фотонных кристаллах // V Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 27-30 октября 2015 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Ковчег, 2015. — С. 76–77.
40. Новицкий Д. В. Взаимодействие чирпированных импульсов света с плотной двухуровневой средой // V Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 27-30 октября 2015 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Ковчег, 2015. — С. 86–87.
41. Новицкий Д. В., Катаркевич В. М., Эфендиев Т. Ш. Кинетика генерации РОС-лазера на светоиндуцированной решетке поляризации при субнаносекундном возбуждении // V Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 27-30 октября 2015 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Ковчег, 2015. — С. 90–91.

42. Новицкий Д. В., Катаркевич В. М., Эфендиев Т. Ш. Теоретическая модель РОС-лазера на светоиндуцированных поляризационных решетках // Квантовая электроника: мат. X Межд. науч.-тех. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / редкол: М. М. Кугейко [и др.] — Мн.: РИВШ, 2015. — С. 3–4.
43. Катаркевич В. М., Новицкий Д. В., Эфендиев Т. Ш. Кинетика излучения РОС-лазера на основе светоиндуцированной решетки поляризации // Квантовая электроника: мат. X Межд. науч.-тех. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / редкол: М. М. Кугейко [и др.] — Мн.: РИВШ, 2015. — С. 5–6.
44. Новицкий Д. В., Катаркевич В. М., Эфендиев Т. Ш. Полуклассическая теория лазерной генерации на светоиндуцированных поляризационных решетках // Современные проблемы физики: сб. науч. тр. VI Межд. школы-конф. мол. уч. и спец., Минск, 8-10 июня 2016 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; под ред. В. В. Машко, Д. В. Новицкого, М. С. Усачёнка. — Мн., 2016. — С. 196–200.
45. Novitsky D. V., Katarkevich V. M., Efendiev T. Sh. Theoretical description of DFB dye lasing by polarization modulation // ЖПС (Специальный выпуск ICONO/LAT 2016). — 2016. — Т. 83, № 6-16. — С. 567–568.
46. Новицкий Д. В., Новицкий А. В. Компенсация потерь и резонансное усиление пропускания в активных металлодиэлектрических структурах // VI Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 20-23 ноября 2017 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Институт физики НАН Беларуси, 2017. — С. 97–98.
47. Новицкий Д. В. Локализация импульсов света в разупорядоченных резонансных средах // VI Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 20-23 ноября 2017 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Институт физики НАН Беларуси, 2017. — С. 99–100.
48. Новицкий Д. В., Новицкий А. В. Динамика фазового перехода в PT-симметричных резонансных средах // VI Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 20-23 ноября 2017 г. / редкол: С. Я. Килин [и др.] — Мн.: Институт физики НАН Беларуси, 2017. — С. 101–102.
49. Novitsky D. V., Shalin A. S. All-optical switching of pulse transmission in disordered resonant media // Journal of Physics: Conference Series (METANANO 2018). — 2018. — Vol. 1092. — P. 012099(1)–012099(4).
50. Novitsky D. V., Karabchevsky A., Lavrinenko A. V., Shalin A. S., Novitsky A. V. Light dynamics in PT-symmetric multilayers: Phase transition, nonreciprocity, and propagation direction locking // Journal of Physics:

Conference Series (METANANO 2018). — 2018. — Vol. 1092. — P. 012100(1)–012100(4).

51. Novitsky A., Novitsky D. V., Shalin A. S. PT-symmetric multilayer systems: homogenization and beam propagation // Thirteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), Rome, Italy, 16-21 September 2019. — IEEE, 2019. — P. X275–X277.
52. Novitsky D. V., Shalin A. S., Novitsky A. V. The exceptional points of non-Hermitian optical systems: Scattering matrix definition, coherent perfect absorption, and lasing // AIP Conference Proceedings (METANANO 2020). — 2020. — Vol. 2300. — P. 020092(1)–020092(3).

Тезисы докладов:

53. Novitsky D. V. Short pulse dynamics in nonlinear disordered photonic crystals // Days on Diffraction: Abstracts of Int. conf., St. Petersburg, Russia, 26-30 May 2014. — St. Petersburg, 2014. — P. 132.
54. Novitsky D. V., Lavrinenko A. V., Shalin A. S., Novitsky A. V. Dynamics of PT-symmetry breaking in multilayers with resonant loss and gain // International Conference on Laser Optics (ICLO): Abstracts, St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018. — IEEE, 2018. — P. 372.
55. Novitsky D. V. Self-induced-transparency pulses in disordered resonant media // International Conference on Laser Optics (ICLO): Abstracts, St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018. — IEEE, 2018. — P. 373.

РЕЗЮМЕ

Новицкий Денис Викторович

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА С РЕЗОНАНСНЫМИ СРЕДАМИ И АКТИВНЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Ключевые слова: резонансные среды, импульсы света, оптические кинки, нелинейные фотонные кристаллы, самозахват импульса, разупорядоченные слоистые структуры, локализация излучения, \mathcal{PT} -симметрия, исключительные точки, связанные состояния в континууме, РОС-лазеры

Цель работы: провести всестороннее теоретическое исследование закономерностей временной динамики взаимодействия электромагнитного излучения с резонансными средами и многослойными структурами, содержащими нелинейные, поглощающие и усиливающие компоненты, в квазинепрерывном и импульсном режимах, а также обосновать возможности использования обнаруженных эффектов для управления характеристиками оптического излучения.

Методы исследования: алгоритмы численного решения уравнений Максвелла–Блоха и волнового уравнения во временной области, метод матрицы переноса для расчёта стационарного отклика многослойных структур.

Полученные результаты: исследованы процессы формирования солитонов самоиндуцированной прозрачности и оптических кинков, а также взаимодействия попутно и встречно распространяющихся импульсов в резонансных двухуровневых средах, позволившие предсказать эффекты их управляемого поглощения и асимметричного пропускания. Изучен механизм самозахвата импульса в одномерном фотонном кристалле с инерционной кубической нелинейностью, приводящий к трансформации спектрального состава, асимметричному пропусканию и индуцированному захвату излучения. Продемонстрированы эффекты локализации импульсов в разупорядоченных нелинейных фотонных кристаллах и резонансных средах. Изучены эффекты нарушения \mathcal{PT} -симметрии в многослойных активных структурах, включающие асимметричную направленную генерацию импульсов света и возбуждение высокодобротных резонансов типа связанного состояния в континууме. Разработана теоретическая модель РОС-лазера на поляризационных решётках, позволяющая описывать динамику и энергетику генерации таких лазеров.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты могут использоваться для предсказания и исследования свойств новых структурированных материалов, разработки компонент активной нанофотоники для генерации, управления и преобразования оптических сигналов, оптимизации параметров устройств на их основе.

РЭЗІЮМЭ

Навіцкі Дзяніс Віктаравіч

ДЫНАМІКА ЎЗАЕМАДЗЕЯННЯ СВЯТЛА З РЭЗАНАНСНЫМІ АСЯРОДДЗЯМІ І АКТЫЎНЫМІ ШМАТСЛОЙНЫМІ СТРУКТУРАМІ

Ключавыя словы: рэзанансныя асяроддзі, імпульсы святла, аптычныя кінкі, нелінейныя фатонныя крышталі, самазахоп імпульсу, разупарадкаваныя слаістыя структуры, лакалізацыя выпраменьвання, PT -сіметрыя, выключныя кропкі, злучаныя станы ў кантынууме, РЗС-лазеры

Мэта даследавання: правесці ўсебаковае тэарэтычнае даследаванне заканамернасцяў часовай дынамікі ўзаемадзеяння электрамагнітнага выпраменьвання з рэзананснымі асяроддзямі і шматслаёвымі структурамі, змяшчаючымі нелінейныя, паглынальныя і ўзмацняючыя кампаненты, у квазібесперапынным і імпульсным рэжымах, а таксама абгрунтаваць магчымасці выкарыстання выяўленых эфектаў для кіравання характарыстыкамі аптычнага выпраменьвання.

Метады даследавання: алгарытмы колькаснага рашэння раўнанняў Максвэла–Блоха і хвалевага раўнання ў часовай вобласці, метады матрыцы пераносу для разліку стацыянарнага водгуку шматслаёвых структур.

Атрыманыя вынікі: даследаваны працэсы фарміравання салітонаў самаіндукаванай празрыстасці і аптычных кінкаў, а таксама ўзаемадзеяння спадарожных і сустрэчных імпульсаў у рэзанансных двухузроўневых асяроддзях, якія дазволілі прадказаць эфекты іх кіраванага паглынання і асіметрычнага прапускання. Вывучаны механізм самазахопу імпульсу ў аднамерным фатонным крышталі з інэрцыйнай кубічнай нелінейнасцю, які прыводзіць да трансфармацыі спектральнага складу, асіметрычнаму прапусканню і індукаванаму захопу выпраменьвання. Прадэманстраваны эфекты лакалізацыі імпульсаў у разупарадкаваных нелінейных фатонных крышталях і рэзанансных асяроддзях. Вывучаны эфекты парушэння PT -сіметрыі ў шматслаёвых актыўных структурах, якія ўключаюць асіметрычную накіраваную генерацыю імпульсаў святла і ўзбуджэнне высокадыхтоўных рэзанансаў тыпу злучанага стану ў кантынууме. Распрацавана тэарэтычная мадэль РЗС-лазера на палярызацыйных рашотках, якая дазваляе апісваць дынаміку і энергетыку генерацыі такіх лазераў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення: вынікі могуць выкарыстоўвацца для прадказання і даследавання ўласцівасцяў новых структураваных матэрыялаў, распрацоўкі кампанент актыўнай нанафатонікі для генерацыі, кіравання і пераўтварэння аптычных сігналаў, аптымізацыі параметраў прылад на іх аснове.

SUMMARY

Novitsky Denis Victorovich

DYNAMICS OF LIGHT INTERACTION WITH RESONANT MEDIA AND ACTIVE MULTILAYER STRUCTURES

Key words: resonant media, light pulses, optical kinks, nonlinear photonic crystals, pulse self-trapping, disordered layered structures, radiation localization, \mathcal{PT} -symmetry, exceptional points, bound states in the continuum, DFB-lasers

Purpose of research is to conduct a comprehensive theoretical study of the regularities of the temporal dynamics of electromagnetic radiation interaction with resonant media and multilayer structures containing nonlinear, absorbing and amplifying components in quasi-continuous and pulsed modes, and also to justify the possibility of using the discovered effects to control the characteristics of optical radiation.

Research methods: numerical algorithms to solve the Maxwell–Bloch equations and the wave equation in time domain, the transfer matrix method for calculating stationary response of multilayer structures.

Results obtained: formation of self-induced transparency solitons and optical kinks, as well as the interaction of co-propagating and counter-propagating pulses in resonant two-level media, have been studied, that made it possible to predict the effects of pulse controlled absorption and asymmetric transmission. The mechanism of pulse self-trapping in the one-dimensional photonic crystal with relaxing cubic nonlinearity is studied resulting in such effects as the transformation of the spectral composition, asymmetric transmission, and induced radiation trapping. The effects of pulse localization in disordered nonlinear photonic crystals and resonant media are demonstrated. The effects of \mathcal{PT} -symmetry breaking in multilayer active structures are studied, including asymmetric directed generation of light pulses and excitation of high-Q resonances governed by the bound state in the continuum. The theoretical model of DFB-lasers based on polarization gratings has been developed allowing us to describe the dynamics and energetics of such lasers.


Recommendations for use and field of application: the results can be used to predict and study the properties of new structured materials, to develop active nanophotonics components for generating, controlling and transforming optical signals, and to optimize the parameters of devices based on those components.

НОВИЦКИЙ ДЕНИС ВИКТОРОВИЧ

**ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА С
РЕЗОНАНСНЫМИ СРЕДАМИ И АКТИВНЫМИ
МНОГОСЛОЙНЫМИ СТРУКТУРАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика



Подписано в печать 27 февраля 2024 г. Формат 60 × 90 1/16.

Тип бумаги – офисная. Печать – ризография.

Объем: 2,7 усл. печ. л.; 2,5 уч. изд. л.

Тираж 60 экз. Заказ № 3.

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

220072, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.

Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси