

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук**

Смолиной Екатерины Олеговны

**на тему: «Структура и динамика локализованных состояний в
линейных и нелинейных топологических фотонных решетках»
по специальности 1.3.4. Радиофизика**

Актуальность темы диссертации

В диссертационной работе Е.О. Смолиной теоретически исследуются локализованные состояния в топологических фотонных решетках, возникающие на границах раздела доменов и точечных дефектах. Изучается их нелинейная динамика, включая формирование квазисолитонных структур, эффекты градиентной катастрофы и модуляционной неустойчивости, в системах, описываемых эффективными дираковскими моделями. Для анализа сложной динамики и классификации топологических фаз в работе применяются современные методы машинного обучения, в частности, алгоритмы разреженной регрессии для вывода эволюционных уравнений и нейронные сети для определения топологических инвариантов по данным о распределении интенсивности. Исследование таких систем представляет фундаментальный интерес для управления светом на субволновом масштабе и создания топологически защищенных элементов для интегральной фотоники – переключателей, сенсоров и источников излучения с заданными свойствами. В связи с этим тема диссертационной работы Е.О. Смолиной, безусловно, **актуальна** и соответствует современным тенденциям на стыке фотоники, искусственного интеллекта и науки о материалах.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Е.О. Смолиной состоит из введения, четырех глав и заключения. Библиографический список включает 172 наименования, отражая ключевые классические и современные работы по теме. Текст диссертации

изложен на 180 страницах, постановка задач и результаты сопровождаются понятными иллюстрациями и аккуратно выполненными графиками.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описана научная новизна, методология исследования, защищаемые положения и апробация результатов.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней представлено современное состояние исследований в области топологической фотоники. Введен набор понятий, необходимый для понимания основного содержания. Рассмотрены основные экспериментальные платформы. Это изготовленные с помощью литографии кремниевые волноводы, метаповерхности и интегральные схемы, а также фотонные решетки на основе волноводов, выполненных с помощью фемтосекундной лазерной записи в кварцевом стекле, либо из полимера с использованием технологии двухфотонной полимеризации, наконец, это волноводы, индуцированные в фоторефрактивных средах. Используемые для теоретического описания эффективные гамильтонианы взяты из моделей SSH, BNZ, BNZ-2 и VH. Разложение гамильтониана по базису матриц Паули позволило изобразить его в виде векторного поля в k -пространстве и наглядно интерпретировать топологические инварианты через вихри вблизи нулей векторного поля.

Глава 2 посвящена линейной и нелинейной динамике краевых импульсов, распространяющихся вдоль границы раздела доменов с различными топологическими инвариантами. На основе модифицированной дираковской модели исследованы эффекты опрокидывания волнового фронта и стабилизации импульсов, а также модуляционная неустойчивость. Отдельный параграф посвящен применению методов машинного обучения для автоматизированного подбора эволюционных уравнений.

Глава 3 фокусируется на методах определения топологических инвариантов. Показано, что анализ модуляционной неустойчивости и нелинейной динамики псевдоспина может служить индикатором топологических фаз. Основное внимание уделено разработке и обучению

нейронной сети для классификации топологических состояний в решетках с потерями по данным об интенсивности без возможности измерения фазы.

Глава 4 содержит исследование локализованных фотон-фононных состояний на топологических дефектах в гибридной метаповерхности. Разработана эффективная дираковская модель, описывающая свойства мод точечного дефекта, которая согласуется с результатами полномасштабного численного моделирования.

В заключении четко сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Практическая значимость работы

Теоретические результаты, аналитические модели и численные методы, разработанные в диссертации, позволяют глубже понять нелинейные эффекты в топологических фотонных структурах. Предложенные алгоритмы машинного обучения, в частности, метод определения топологической фазы по распределению интенсивности, адаптированы для использования в реальных лабораторных условиях. Исследованные платформы могут стать основой для функциональных элементов фотонных интегральных схем (соединительных линий, переключателей, резонаторов), компактных источников излучения и высокочувствительных сенсоров.

Личный вклад автора в получение результатов диссертации состоит в участии в постановке рассмотренных задач, их решении, проведении численных расчетов с помощью разработанных для этого оригинальных методов и компьютерных программ, а также анализе полученных данных и не вызывает сомнений.

Замечания по диссертационной работе:

1) В обзорной главе при описании экспериментальных платформ топологической фотоники нет параграфа про фотонные кристаллы, хотя в приложении дается вывод уравнений Максвелла для фотонных кристаллов.

2) В тексте несколько раз используется теорема Блоха, упоминаемая на стр. 130 и 169. При этом в аналогичных случаях на стр. 21, 90, 174 вместо

ссылки на теорему говорится о преобразовании Фурье. Используемое преобразование Фурье представляется тесно связанным с теоремой Блоха. Было бы полезно сопоставить вывод теоремы с преобразованием Фурье.

3) На стр. 174 проведен анализ инверсной и хиральной симметрий SSH-модели. Не хватает анализа временной симметрии, которая представляется наиболее важной с точки зрения получения однонаправленных состояний. Какие из использованных моделей, приведенных на стр. 24, рис. 3, нарушают временную симметрию: SSH, BHZ, BHZ-2, VH?

4) В разделе 2.6 делается вывод о том, что в модифицированном нелинейном уравнении Шредингера увеличение интенсивности волны стабилизирует ее и предотвращает обрушение фронта: «нелинейная скорость оказывает стабилизирующее влияние на краевую моду и снижает вероятность обрушения ее фронта». С точки зрения метода характеристик, наоборот, обрушение происходит тем раньше, чем больше нелинейная скорость. Было бы полезно дать более развернутую физическую интерпретацию этого эффекта, приведя аналогии из других областей нелинейной физики.

5) В разделе 3.3 при описании нейросети для классификации топологических фаз не указаны конкретные гиперпараметры модели (количество слоёв, функции активации, оптимизатор и т. п.). Это затрудняет воспроизведение результатов и оценку устойчивости алгоритма.

6) При записи решаемых уравнений не хватает ссылок на использованные источники, содержащие строгий вывод уравнений. Например, на учебник А.А. Балакина и Г.М. Фраймана «Основы теории колебаний и волн. Динамика сосредоточенных и распределенных систем». Хотя методы описаны достаточно строго и в значительной мере вынесены в приложения, в Приложении 3 целесообразно добавить ссылку на книгу D. Vanderbilt «Berry Phases in Electronic Structure Theory».

Следует особо отметить, что представленная диссертация – это вторая известная мне диссертационная работа, посвященная топологической

фотонике и написанная на русском языке, после диссертации Д.В. Жирихина, опубликованной в 2020 году.

Сделанные замечания не затрагивают выносимые на защиту положения и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений

Анализ диссертационной работы и публикации автора по теме исследования свидетельствуют о новизне и обоснованности научных положений, выносимых автором на защиту. Результаты исследования, вошедшие в диссертацию, могут считаться научно достоверными. Это подтверждается последовательным применением строгих аналитических методов (асимптотический анализ, метод сильной связи), их верификацией с помощью независимых численных расчетов (метод конечных элементов, решение параксиального уравнения) и согласием с известными экспериментальными данными. Основные результаты опубликованы в ведущих международных рецензируемых журналах, таких как Physical Review Letters, Nature Communications и Nanophotonics, и систематически докладывались на тематических российских и международных конференциях.

Заключение

Считаю, что в целом диссертационная работа Е.О. Смолиной «Структура и динамика локализованных состояний в линейных и нелинейных топологических фотонных решетках» выполнена на актуальную тему, на высоком научном уровне. Текст диссертации выдержан в строгом научном стиле и для ясности сопровождается качественными иллюстрациями. **Автореферат** соответствует тексту диссертации, правильно и полно передаёт её содержание.

Диссертация «Структура и динамика локализованных состояний в линейных и нелинейных топологических фотонных решетках» представляет собой завершённую научно-квалификационную исследовательскую работу, отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых

степеней. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.4. Радиофизика.

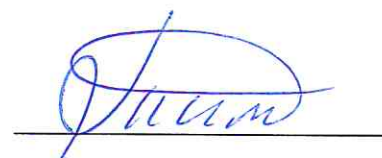
Таким образом, соискатель Смолина Екатерина Олеговна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Выражаю **согласие** на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», заведующий
лабораторией фотоники молекулярных систем,
ведущий научный сотрудник Института физики
им. Л.В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук – обособленного
подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

Тимофеев Иван Владимирович



«11» ноября 2025г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (3912) 90-56-37. E-mail: tiv@iph.krasn.ru

Степень и шифр специальности, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация:

Доктор физико-математических наук, 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/38, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук –

обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

Подпись официального оппонента

Тимофеева Ивана Владимировича

удостоверяю:

ученый секретарь Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук — обособленного подразделения ФИЦ
КНЦ СО РАН,
к.ф.-м.н.



Злотников А.О.