

ОТЗЫВ

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

Попковой Анны Андреевны

**на тему: «ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ И
ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИК И СВЕРХБЫСТРОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В
НАНОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

Актуальность темы диссертации. В последнее время на передний план выходят исследования оптических свойств атомарно-тонких кристаллов, среди которых особое место занимают двумерные полупроводники на основе графена, дихалькогенидов переходных металлов и близкие к ним материалы: гексагональный нитрид бора, дисульфид и диселенид олова и др. Значительные энергии связи и силы осциллятора экситонов во многих двумерных полупроводниках, особенности кулоновского взаимодействия в системах размерности два, специфические – киральные – правила отбора при оптических переходах приводят к новым эффектам линейной и нелинейной оптики в средах на основе дихалькогенидов переходных металлов и к особенностям в известных явлениях, не наблюдавшихся в объемных материалах.

К настоящему времени оптический отклик атомарно-тонких кристаллов исследован достаточно подробно, однако с точки зрения возможных применений и фундаментальных физических эффектов привлекательными выглядят системы из мезоскопического числа слоев – тонкие пленки двумерных материалов и наносистемы на их основе. Такие системы занимают нишу между объемными и экстремально двумерными кристаллами, они исследованы недостаточно. В частности, к настоящему времени остаются открытыми вопросы о нелинейном отклике таких систем и о взаимосвязи

материальных – экситонных – резонансов и оптических резонансов, обусловленных геометрией системы – резонансов Ми.

Экспериментальному исследованию ряда вопросов, связанных с генерацией второй и третьей оптических гармоник в наносистемах на основе двумерных материалов, а также модуляцией оптического отклика в структурах на основе графена посвящена диссертационная работа А. А. Попковой. **Выбор направления исследований и круг поставленных задач определяет значительную актуальность темы рассматриваемой диссертации.**

Анализ содержания работы, новизна и достоверность полученных результатов. Цель диссертационной работы заключается в экспериментальном исследовании особенностей генерации оптических гармоник в тонких пленках и нанорезонаторах на основе двумерных материалов, а также в изучении эффекта субпикосекундной модуляции коэффициента отражения монослоя графена, помещенного на фотонный кристалл.

Диссертация состоит из *введения*, где описаны цели и задачи научного исследования, обоснована их актуальность, а также приведены основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, *четырех глав*, первая из которых содержит краткий обзор литературы по тематике исследований, а остальные три – новые и оригинальные научные результаты, полученные автором, *заключения*, где подведены итоги работы, *библиографии* и приложений.

Обзор исследований, приведенный в *главе 1* диссертационной работы, достаточно подробно отражает состояние данной области физики на момент подготовки диссертации, а также содержит описание ряда физических свойств рассматриваемых далее двумерных систем. В этой же главе приведены основные формулы, описывающие нелинейно-оптические эффекты в тонких пленках и наночастицах, обсуждаются резонансы Ми.

Глава 2 содержит результаты исследований генерации третьей оптической гармоники в пленках гексагонального нитрида бора. Приводится подробное описание экспериментальной установки и методики эксперимента, а также значительный набор экспериментальных данных, свидетельствующих об обнаружении эффекта. Также описываются результаты исследования генерации третьей гармоники. Автор проводит поляризационные исследования эффекта, а также изучает спектральную зависимость генерации третьей гармонии и зависимость интенсивности излучения на тройной частоте от толщины квазидвумерной пленки. Сильной стороной приведенных исследований является сопоставление результатов эксперимента по зависимости интенсивности третьей гармонии от толщины пленки с данными численного моделирования, которое хорошо описывает достаточно сложную зависимость, обнаруженную на эксперименте.

В этой же главе автор кратко описывает результаты экспериментов по генерации второй оптической гармоники в квазидвумерных дисульфиде и диселениде олова. Эти данные также представляют определенный интерес для физики материалов, но главным образом демонстрируют применимость используемой автором методики и для исследования генерации второй гармоники.

В главе 3 диссертационной работы приведены результаты экспериментальных исследований процесса генерации второй оптической гармоники в нанорезонаторах из дихалкогенидов переходных металлов с основным акцентом на структуры на основе MoS_2 . Основное внимание уделено эффектам совместного возбуждения оптических резонансов (резонансов Ми) наносистемы и экситонных резонансов в материале. Автор подробно описывает результаты измерения эффекта на нанодисках разного размера. Убедительно показано значительное усиление генерации второй гармоники при одновременном совпадении длины волны накачки с магнитодипольным резонансом Ми нанодиска и длины волны второй гармоники с длиной волны С-экситона – своего рода двойной резонанс в

эффекте генерации второй оптической гармоники. Следует отметить, что обнаружению этого эффекта способствовали как детальная характеристика образцов (в том числе методиками комбинационного рассеяния света), так и оптимизация параметров структур на основе результатов численного моделирования.

Глава 4 диссертации посвящена исследованиям эффекта сверхбыстрой модуляции коэффициента отражения монослоя графена, помещенного на поверхность одномерного фотонного кристалла, и изучению механизмов усиления этой модуляции. Автор начинает изложение результатов с аналитического описания структуры фотонных состояний на поверхности фотонного кристалла и данных моделирования спектров отражения, что позволяет подобрать оптимальные для экспериментальной реализации параметры структуры. Показано, что сверхбыстрое – на масштабах 100 фс – изменение отражения структуры «графен+фотонный кристалл» связано с изменением под действием луча накачки как действительной, так и мнимой части отклика графена. При этом наблюдаемый эффект, как демонстрируют дополнительные измерения и моделирования, не сводится к суперпозиции эффектов, наблюдаемых в графене и фотонном кристалле, что приводит автора к выводу о том, что усиление модуляции связано с возбуждением поверхностных (блоховских) волн в фотонном кристалле. Полезным результатом является также оценка на основе моделирования максимальной глубины модуляции (3%), которая может наблюдаться без фокусировки пучка.

Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе.

Достоверность основных полученных результатов и выводов также не подлежит сомнению. Это обусловлено весьма глубокой методологической проработкой, использованием современных экспериментальных методик, воспроизводимостью измерений и сопоставлением результатов экспериментов с численным моделированием, а также, где это возможно, с

результатами других авторов. Достоверность результатов дополнительно подтверждается их внутренней непротиворечивостью, а также их широкой апробацией диссертации на научных семинарах и конференциях.

Научная и практическая значимость. В диссертационной работе А.А.Попковой получены новые сведения о нелинейных восприимчивостях гексагонального нитрида бора и других квазидвумерных систем. Потенциально, результаты исследований открывают возможности для создания оптических устройств на основе двумерных и квазидвумерных материалов. В частности, предложенный в диссертации метод усиления генерации второй оптической гармоники может быть применим для создания компактных преобразователей частоты, а усиление модуляции коэффициента отражения графена перспективно для реализации полностью оптического переключения.

Замечания. Диссертация А. А. Попковой легко читается и оставляет ощущение аккуратно выполненного, вдумчивого и проработанного научного исследования. Тем не менее, по работе имеются замечания, из которых можно выделить наиболее существенные:

- 1) Сложный характер зависимости интенсивности третьей гармоники от толщины пленки нитрида бора (рис. 36) хорошо описывается численным моделированием. Насколько можно судить из формул (28) и (29) осцилляции интенсивности носят интерференционный характер, а значит должны зависеть от длины волны падающего света. Проверялось ли это?
- 2) Чем обусловлен выбор резонанса, связанного с С-экситоном, при исследовании второй гармоники в наносистемах на основе дихалькогенидов переходных металлов? Обусловлено ли это с особенностями экспериментальной установки или особенностями самого экситонного резонанса, в частности, его значительной шириной.

3) Обсуждение природы генерации второй оптической гармоники в пленке MoS_2 , которая обладает центром инверсии, нельзя считать полностью удовлетворительным.

Эти замечания в значительной мере являются пожеланиями для дальнейших исследований, они не умаляют высокого качества самой диссертационной работы.

Заключение. Диссертация Анны Андреевны Попковой является завершенной научной работой, выполненной на высоком уровне. Результаты вошедших в диссертационную работу исследований опубликованы в авторитетных и высокорейтинговых тематических журналах, включая ACS Photonics и Nanomaterials, они прошли необходимую апробацию на конференциях и семинарах. Следует подчеркнуть гармоничное сочетание экспериментальных исследований и компьютерного моделирования. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Попкова Анна Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

Ведущий научный сотрудник

сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук,

член-корреспондент РАН

Глазов Михаил Михайлович

6 декабря 2022 г.

Контактные данные:

тел.: _____,

e-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.10 (1.3.11) – Физика полупроводников

Адрес места работы:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26,

Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе Российской Академии наук,

сектор теории квантовых когерентных явлений в твердом теле

Тел.: +7 (812) 297-22-45; e-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Подпись сотрудника М.М. Глазова удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ РАН,

кандидат физико-математических наук,

Патров М.И.

« ____ » _____ 2022 года