

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»

Диссертационная работа А.А. Попковой посвящена ряду актуальных проблем, связанных с исследованием оптических эффектов генерации второй и третьей гармоник в тонких пленках и нанорезонаторах на основе двумерных материалов, а также эффекта сверхбыстрого переключения в монослое графена, нанесенного на поверхность одномерного фотонного кристалла. Актуальность темы диссертации обусловлена растущим интересом к исследованию двумерных материалов, в том числе их оптических и нелинейно-оптических свойств. Благодаря двумерной природе такие материалы демонстрируют свойства, отличные от объемных аналогов, что делает их перспективными для создания на их основе плоских оптических и опто-электронных устройств. Однако величина нелинейно-оптических эффектов в двумерных слоях оказывается существенно ограничена малым количеством вещества. В работе А. А. Попковой объектами исследования являются тонкие пленки, а также нанорезонаторы из двумерных материалов, объемный характер которых позволяет усиливать проходящие в структурах нелинейные эффекты. Исследование наноструктур из двумерных материалов представляется новым актуальным направлением, в рамках которого А. А. Попковой были получены новые результаты.

Текст диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 147 страниц. В диссертации содержится 92 рисунка. Список литературы состоит из 178 наименований.

Во *введении* представлен краткий обзор современного состояния исследований по теме диссертации, определены актуальность выбранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи работы, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология диссертационного исследования, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, а также приведены выносимые на защиту положения.

Первая глава содержит подробный обзор литературы по теме диссертации. Описаны физические свойства основных классов двумерных материалов, изложены

принципы нелинейной оптики, как для объемных сред, так и для монослоев. Рассмотрены механизмы усиления нелинейно-оптических эффектов.

Вторая глава содержит описание экспериментов, проведенных в рамках диссертационной работы, по исследованию эффектов генерации второй и третьей оптических гармоник в тонких пленках квазидвумерных материалов. Обнаружен эффект генерации третьей оптической гармоники в тонких пленках гексагонального нитрида бора, получено значение его нелинейно-оптической восприимчивости третьего порядка.

Третья глава посвящена исследованию эффекта генерации второй оптической гармоники в нанорезонаторах дисках из дисульфида молибдена, геометрические размеры которых подобраны таким образом, чтобы структуры поддерживали возбуждение резонансов типа Ми на длине волны накачки, соответствующей удвоенной длине волны спектральной линии экситона. В таких образцах было показано значительное усиление эффективности генерации по сравнению с монослоем.

Четвертая глава содержит описание экспериментов по исследованию сверхбыстрой модуляции коэффициента отражения структуры, состоящей из монослоя графена, нанесенного на поверхность одномерного фотонного кристалла, поддерживающего возбуждение блоховских поверхностных электромагнитных волн. Показано, что возбуждение поверхностного состояния приводит к увеличению амплитуды модуляции коэффициента отражения на порядок по сравнению со случаем ортогональной поляризации, в которой возбуждение волны не наблюдается. Экспериментальные результаты подкрепляются численными расчетами.

Научные положения и выводы, представленные в работе, являются в достаточной мере обоснованными. Результаты проведенных исследований представляются достоверными, они неоднократно докладывались на международных профильных конференциях и опубликованы в 8 работах, в том числе 4 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

В рамках диссертационной работы автором были получены результаты, обладающие научной новизной. В частности, обнаружен эффект генерации третьей оптической гармоники в тонких пленках гексагонального нитрида бора. Впервые показана возможность увеличения эффективности генерации второй оптической гармоники в нанодисках дихалкогенидов переходных металлов при возбуждении резонанса типа Ми на удвоенной длине волны экситонного перехода. Обнаружено увеличение модуляции коэффициента отражения монослоя графена при нанесении его на поверхность фотонного кристалла, поддерживающего возбуждение блоховских поверхностных электромагнитных волн.

Несомненным достоинством диссертационной работы А. А. Попковой является большой объем проведенных исследований, их высокий научный уровень и значительное количество новых экспериментальных результатов. Их достоверность подтверждается сравнением экспериментальных данных с результатами, полученными различными аналитическим и численными методами. Важно также отметить, что автор диссертации провел большую методическую работу, объясняя качественно физические причины появления тех или иных эффектов в рассматриваемых задачах. Работа написана ясным хорошим научным языком, хорошо структурирована и иллюстрирована многочисленными рисунками.

К диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. В части обзорной главы I, которая касается анализа работ по генерации оптических гармоник в тонких пленках, следовало бы обсудить результаты по квазисинхронной генерации гармоник в планарных фотонных кристаллах.

2. На рис. 32 в главе II показана зависимость интенсивности генерации третьей оптической гармоники от пленки гексагонального нитрида бора в зависимости от угла между кристаллической осью образца и поляризацией накачки. Как будет выглядеть данный график при наличии анализатора в канале детектирования?

3. В главе III обсуждается возможность увеличения эффективности генерации второй оптической гармоники в нанодисках их дихалкогенидов переходных металлов при возбуждении резонансов типа Ми на удвоенной длине волны экситонной линии. Однако показанные эффективности преобразования (менее 10^{-7}) остаются достаточно низкими. Как это соотносится с величинами, наблюдаемыми в других системах на основе двумерных материалов? Можно ли здесь добиться существенного увеличения эффективности преобразования за счет фазового квазисинхронизма?

4. Автор местами недостаточно внимательно отнеслась к используемой терминологии и ссылкам. Так, на стр. 69 термин «локальное поле» используется не для микроскопического поля, как это обычно принято, а для макроскопического среднего поля, локализованного вблизи поверхности нанодисков при возбуждении резонансов Ми. При использовании формулы (43) дается ссылка [127] на книгу 1984 г., а не на оригинальную знаменитую работу С. М. Рытова (ЖЭТФ 1954 г.).

5. В тексте встречаются опечатки. Например, потеряны части подписей под рис. 33 и рис. 54. В главе IV у величины плотности мощности неоднократно указана размерность $[\text{Дж}/\text{м}^2]$ вместо $[\text{Вт}/\text{м}^2]$ (стр. 112, 120 и др.).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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 безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
Манцызов Борис Иванович

« 12 » декабря 2022 г.

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: mantsyzov@phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Тел.: _____, e-mail: mantsyzov@phys.msu.ru

Подпись Манцызова Бориса Ивановича УДОСТОВЕРЯЮ:

Ученый секретарь Ученого совета
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор

В.А. Карavaев

« _____ » декабря 2022 г.