

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Быкова Антона Юрьевича **«Оптические и нелинейно-оптические эффекты в наноматериалах с линейным электронным спектром»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Диссертационная работа Быкова А.Ю. посвящена экспериментальному исследованию линейного оптического и квадратичного нелинейно-оптического отклика группы материалов, обладающих двумерными электронными состояниями с линейным электронным спектром - графена и топологического изолятора Bi_2Te_3 . Интерес к данной тематике связан в первую очередь с бурным развитием физики графена и топологических изоляторов, являющихся уникальными объектами, обладающими свойствами, не присущими другим объектам физики конденсированного состояния вещества. При этом большинство исследований сосредоточено на проведении транспортных измерений или спектроскопии фотоэмиссии, и, таким образом, существует значительный пробел в исследовании их оптических и нелинейно-оптических свойств. Во-вторых, данные материалы открывают широкие перспективы для применения в области высокоскоростной электроники, спинтроники и оптоэлектроники, включая полевые транзисторы, структуры с переносом спинового момента, а также прозрачные проводящие покрытия и устройства пассивной синхронизации мод в лазерных резонаторах. Суммируя, можно сказать, что выбранное в диссертационной работе направление исследований является одним из интенсивно развиваемых направлений развития современной фотоники и наноматериалов.

Использованные в диссертационной работе экспериментальные методы - генерация оптической второй гармоники, метод накачка-зондирование - являются современными и эффективными методами исследования оптики и спектроскопии материалов. Их использование для исследования свойств графена, а так же поверхностных состояний топологического изолятора позволяет реализовать высокую поверхностную селективность и высокое временное разрешение. Это, в свою очередь, позволяет изучать динамику процессов, определяющих оптический и нелинейно-оптический отклик систем.

Научная новизна полученных в работе результатов связана с экспериментальным выявлением механизмов формирования оптического и нелинейно-оптического взаимодействия лазерного излучения с выбранными наноматериалами. В частности, в работе впервые рассмотрен квадратичный нелинейно-оптический отклик многослойного

графена при протекании в нем постоянного электрического тока. Кроме того, значительная часть работы посвящена изучению временных характеристик процессов, определяющих оптический и, впервые, квадратичный нелинейно-оптический отклик теллурида висмута.

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечена продемонстрированной воспроизводимостью экспериментальных результатов, проведением экспериментальных исследований на современном научном оборудовании с использованием современных методов обработки данных. Экспериментальные данные подтверждены расчетами и имеют качественное объяснение в рамках феноменологического подхода. Результаты работ опубликованы в известных российских и международных рецензируемых научных журналах.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация представлена на 160 страницах (включая титульный лист) и содержит 63 иллюстрации, 4 таблицы и 152 библиографических ссылки. Первая глава посвящена обзору литературы, в трех последующих главах изложены оригинальные результаты, полученные автором. Во введении отмечены актуальность исследований, научная новизна работы, практическая значимость, представлен личный вклад автора, сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ в отечественной и зарубежной литературе по тематике диссертации, изложено современное состояние науки по вопросам, исследовавшимся в работе. В первых двух параграфах главы приведены общие сведения по формированию нелинейно-оптического отклика среды и, в частности, генерации второй гармоники оптического спектрального диапазона. Третий параграф посвящен обзору микроскопической модели генерации индуцированной током второй гармоники в полупроводниках. Четвертый и пятый параграфы главы посвящены обзору основных работ по гиперрэлеескому рассеянию света на частоте генерации второй гармоники оптического спектрального диапазона и подробному обзору метода накачка-зондирование в материалах различных типов, включая металлы, полупроводники, диэлектрики, ферромагнитные среды и топологические изоляторы. Далее в главе приведен подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию электронных и оптических свойств графена и трехмерных топологических изоляторов, включая транспортные, измерения эффекта Холла, спектроскопию фотоэмиссии и квадратичные и кубичные нелинейно-оптические процессы.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию квадратичного нелинейно-оптического отклика многослойного графена, изготовленного методом химического газофазного осаждения, в том числе в условиях протекания электрического тока. Исследование структурных свойств графеновых пленок, проведенное с использованием комбинации азимутальной анизотропии второй гармоники, исследования нелинейного гиперрэлеевского рассеяния света на частоте второй гармоники и сканирующей микроскопии второй гармоники, позволили достоверно классифицировать многослойный графен как изотропную сильно неоднородную нелинейную среду с локализацией источников квадратичной нелинейно-оптической поляризации в окрестностях границ между микрокристаллитами графена. Экспериментальное исследование спектроскопии ВГ в графене, помещенном на кремниевую подложку, в условиях протекания электрического тока продемонстрировали существенную модуляцию интенсивности второй гармоники, достигающей около 20% и зависящей от направления и величины тока. Предложен феноменологический подход, описывающий наблюдаемые эффекты в терминах генерации токоиндуцированной гармоники в графене.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования динамики процессов, определяющих линейный оптический отклик (отражение) монокристаллов трехмерного топологического изолятора Bi_2Te_3 в широком диапазоне температур методом накачка-зондирование с использованием в качестве накачки излучения в ближней инфракрасной области спектра (1300 нм), что отличает проведенные исследования от работ, опубликованных ранее другими группами. Наблюдаемая временная зависимость коэффициента отражения интерпретирована автором на основе обобщенной двухтемпературной модели и литературных данных как комбинация процессов возбуждения и нагрева газа свободных носителей заряда, амбиполярной диффузии, охлаждения электронной подсистемы и нагрева кристаллической решетки, а также когерентного возбуждения активных фононных мод комбинационного рассеяния света. При этом продемонстрировано наличие в фурье спектре сигнала всех четырех разрешенных для данного типа кристаллической решетки (D^5_{3d}) фононных мод, не наблюдавшихся в подобных условиях ранее. Автор связывает данное наблюдение с использованием накачки в области большей прозрачности материала, что облегчило возбуждение поперечных фононных мод в соответствии с механизмом комбинационного рассеяния света.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению временных характеристик процессов, определяющих квадратичный нелинейно-оптический отклик

(генерацию второй гармоники) в тонких пленках (толщина около 40 нм) топологического изолятора Bi_2Te_3 методом накачка-зондирование на масштабах задержки до 100 пс. Анализ экспериментальных результатов позволил сделать вывод, что оптический отклик определяется следующими процессами в материале: при времени $t < 0,5$ пс - возбуждением электрон-дырочной плазмы в теллуриде висмута и экранировкой приповерхностного электрического поля; при $0,5 < t < 2$ пс - диффузией носителей заряда, определяющей динамику экранировки поля на задней грани пленки; при $t > 2$ пс рекомбинацией носителей заряда, обеспечивающей восстановление изначального значения поля, а также на всех временах — когерентное возбуждение ИК-активных фононных мод. Проведенный автором феноменологический симметричный анализ позволил выделить несколько мод, не наблюдавшихся ранее в экспериментах по когерентному возбуждению, а именно ИК-активные моды на частотах 1,5 ТГц и 2,9 ТГц. Проведенный анализ также позволил связать фононную моду на частоте 2 ТГц с приповерхностным нарушением симметрии, что представляет особенный интерес в связи с перспективами использования поверхностных фононных мод для управления свойствами поверхностных состояний в топологическом изоляторе.

В четвертой главе также приведены результаты экспериментов по исследованию динамики нелинейного магнитооптического эффекта Керра от структуры топологический изолятор/ферромагнетик. В частности, экспериментально наблюдается динамика намагниченности на интерфейсе топологический изолятор/ферромагнетик, что является важным шагом к дальнейшим исследованиям в области структур на основе топологических изоляторов.

В автореферате диссертации перечислены научная новизна, практическая значимость, цели диссертационной работы, и кратко приведены основные полученные в работе результаты. Также приведен список публикаций автора в журналах и сборниках тезисов. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание диссертационной работы.

В тоже время, хотелось бы отметить следующие замечания по диссертации:

1. В тексте диссертации не приводятся экспериментальные результаты, подтверждающие наличие в исследованных образцах теллурида висмута топологически защищенных поверхностных состояний.
2. В тексте диссертационной работе отсутствует полноценное микроскопическое описание процесса генерации второй оптической гармоники в графене.

3. В тексте диссертации не проведен учет влияния деформации плёнки многослойного графена на квадратичный нелинейно-оптический отклик графена при проведении экспериментов по генерации ВГ в условиях протекания тока, что возможно при прижимании токопроводящих контактов к пленке графена на кремниевой подложке.
4. В работе не рассмотрено возможное влияние адсорбции атмосферной воды на поверхность графена и модификация оптических и нелинейно-оптических свойств графена за счет этого эффекта.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают научной значимости работы. По теме диссертации опубликовано 4 работы в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Быкова А. Ю. «Оптические и нелинейно-оптические эффекты в наноматериалах с линейным электронным спектром» отвечает всем требованиям ВАК РФ и требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней в редакции Постановления №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Быков Антон Юрьевич несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 (лазерная физика).

в.н.с. лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН,

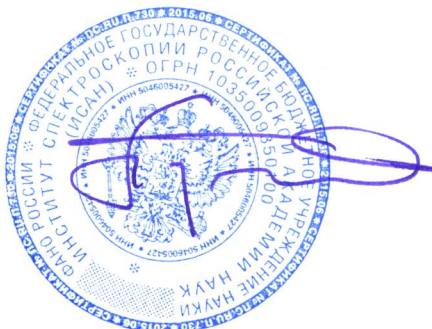
кандидат физико-математических наук

П.Н.Мелентьев

Подпись П.Н. Мелентьева удостоверяю:

Ученый секретарь ИСАН,

кандидат физико-математических наук



Е.Б. Перминов