

Отзыв официального оппонента

*на диссертационную работу Михаила Васильевича Дурнева
“ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ И НЕЛИНЕЙНЫЙ ТРАНСПОРТ В
ДВУМЕРНЫХ ДИРАКОВСКИХ МАТЕРИАЛАХ”, представленную на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.11 - физика полупроводников.*

В диссертации М.В.Дурнева, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников, приведены результаты теоретических работ по ряду современных направлений физики низкоразмерных материалов, ориентированных на изучение топологических особенностей электронной структуры и нелинейного электромагнитного отклика. Успехи в развитии технологии в последние десятилетия стимулировали экспериментальную и теоретическую активность по исследованию квантового транспорта в низкоразмерных системах и, в частности, анализу роли нетривиальной топологии электронных состояний в измеряемых транспортных характеристиках. Топологический подход к таким задачам оказался вообще весьма эффективным и стал, по сути, новым перспективным направлением физики конденсированных сред. Заметим, что при этом речь идет не только об интересной новой физике, но и возможных приложениях, связанных с топологической защищенностью электронных состояний к определенным типам возмущающих воздействий. Особое место в исследованиях нелинейных транспортных свойств различных низкоразмерных систем занимают работы по фотогальваническим эффектам и эффектам увлечения в поле электромагнитной волны различной поляризации. Принципиальная физика генерации фототоков в различных полупроводниковых и металлических системах за счет нелинейных эффектов второго порядка в электромагнитном отклике успешно изучалась в течение нескольких десятилетий. Рассматриваемая диссертация содержит ряд **новых** интересных теоретических разработок в данном направлении, связанных с особенностями низкоразмерных, и, в том числе, топологически нетривиальных систем. На мой взгляд, автору диссертации удалось внести свой существенный вклад в развитие данной области, получив ряд **актуальных** результатов, многие из которых уже сейчас были использованы для объяснения конкретных экспериментов. Здесь надо подчеркнуть, что тесное взаимодействие с экспериментаторами и ориентация теоретической работы на интерпретацию экспериментальных результатов безусловно можно считать сильной стороной данной диссертации.

В целом, следует отметить, что значительная часть рассмотренных в диссертации задач может быть отнесена к «горячим темам» в современной физике конденсированных сред, что показывает **актуальность** результатов работы и их **значимость**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 204 страницах, содержит 56 рисунков.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена теоретическому решению задачи об энергетическом спектре электронных состояний в квантовых ямах HgTe/CdHgTe с различной кристаллографической ориентацией, включая расчеты спектра краевых мод в двумерном топологическом изоляторе на основе квантовой ямы HgTe/CdHgTe в магнитном поле. Расчеты выполнены с использованием k_p метода. Среди интересных новых предсказаний можно отметить обнаружение сильной анизотропии эффекта Зеемана для краевых спиральных состояний в магнитном поле, лежащем в плоскости ямы.

Во **второй главе** автор переходит к решению задачи о фототоках, возникающих либо в результате переходов между электронными состояниями в краевых каналах двумерных топологических изоляторов на основе упомянутых выше квантовых ям, либо за счет фотоионизации состояний в краевых каналах. Автор анализирует симметричные особенности фотогальванических эффектов и эффектов увлечения в таких системах, вычисляет вероятности переходов между краевыми модами и фотоионизации этих мод под действием электромагнитной волны и в итоге получает выражения для фототоков. Также в данной главе решена задача о генерации краевых фототоков в двумерных системах в сильном магнитном поле в режиме квантового эффекта Холла. Полученные результаты представляются достаточно **оригинальными** и **новыми**. Следует особо отметить, что результаты расчетов в этой главе сопоставлены с экспериментальными данными по измерению краевых фототоков в квантовых ямах и графене.

В **третьей главе** автор представляет результаты своих теоретических исследований по еще одной горячей теме – электронные состояния и фототоки в монослоях диалкогогенидов переходных металлов, которые используются в инженерии так называемых ван дер Ваальсовых структур. Автором исследован краевой фотогальванический эффект, возникающий при межзонных оптических переходах в этих двумерных материалах. Также в этой главе предсказана возможность усиления фототока в структуре, состоящей из большого количества полосок шириной порядка нескольких длин свободного пробега, что может представлять интерес в плане оптимизации геометрии образцов для экспериментального наблюдения рассматриваемых фотогальванических эффектов.

Четвертая глава посвящена работам автора по нелинейным краевым эффектам в двумерных системах, связанным с внутризонной кинетикой электронов и дырок в поле электромагнитной волны. Подход, используемый автором, основан на кинетическом уравнении. Рассчитан постоянный краевой ток и ток на удвоенной частоте падающей волны (вторая гармоника), проанализирована зависимость фототока от магнитного поля, исследована зависимость от типа поляризации падающей волны. Полученные результаты находятся в согласии с экспериментами на образцах двухслойного графена.

Пятая глава содержит анализ фотоиндуцированных эффектов, связанных с наличием в электромагнитном отклике членов, кубичных по электрическому полю. Речь идет о фотоиндуцированных эффектах Холла, Фарадея и Керра в двумерном электронном газе. Интерес к этой проблеме связан с недавними экспериментальными наблюдениями аномально большой величины эффективного магнитного поля, создаваемого циркулярно поляризованной падающей электромагнитной волной в образцах графена. Автор предлагает механизм нелинейности, связанный с зависимостью времен релаксации от энергии, который может объяснить большую величину эффективного магнитного поля. Теоретический анализ основан на решении кинетического уравнения, представляется **оригинальным** и **интересным**.

Выводы, приведенные автором в **заключении** диссертации, содержат краткое изложение основных результатов, полученных в диссертационной работе.

Достоверность основных выводов, сформулированных диссертантом, обеспечивается правильным выбором необходимых теоретических методов исследования и апробацией работы на российских и международных конференциях. **Новизна и практическая значимость** полученных результатов, подтверждаются большим количеством публикаций в ведущих физических журналах, цитированием работ диссертанта другими исследователями и анализом связи теоретических предсказаний с известными экспериментальными данными.

Вместе с тем по диссертации можно сделать некоторые замечания и сформулировать ряд вопросов.

1. В выражении для краевых фототоков в разделе 2.3.2. появляется феноменологический параметр τ_r – время релаксации электронов в краевом канале, связанной с процессами рассеяния с переворотом спина. Параметр этот существенно связан с различными возможными механизмами нарушения топологической защиты краевых состояний. Автор указывает, что наиболее вероятный механизм при этом связан с взаимодействием краевых электронов с электронными или дырочными лужами, которые формируются вблизи краёв образца за счёт флуктуаций потенциала. Если принять такую версию, то не следует ли ожидать, что такие лужи сами могут оказывать влияние на фотоотклик, приводя к появлению циркулирующих вокруг этих дефектов фототоков? Насколько это обстоятельство может повлиять на фотоотклик системы?
2. Влияние экранировки на генерацию тока на второй гармонике падающего излучения подробно рассмотрено в разделе 4.5. Представляется, что в режиме сильной экранировки ситуация должна соответствовать достаточно большому коэффициенту отражения падающей электромагнитной волны от края структуры. Оказывает ли это отражение заметное влияние на результаты для постоянного тока, рассмотренного в данной главе? В результатах четвертой главы указано, что масштаб спада краевых токов определяется длиной свободного пробега. Чем этот масштаб будет определяться в баллистическом случае?
3. Учитывая, что общий вид кубической нелинейности по электрическому полю должен содержать квадрат модуля поля, умноженный на вектор электрического поля волны, возникает казалось бы естественный вопрос: может ли прямая подстановка суммарного поля циркулярно и линейно поляризованной волн в этот кубический член дать искомые в пятой главе эффекты, описываемые соотношением типа 5.12? Или же для этого окажется существенным конкретный вид частотной зависимости тензора обобщённой проводимости в соотношении 5.1?

Указанные выше вопросы и замечания, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, следует отметить, что диссертационная работа М.В.Дурнева является существенным вкладом в развитие нового направления физики полупроводников – теории электронных состояний и фотогальванических эффектов в двумерных материалах.

Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. **Автореферат полностью отражает содержание диссертации.**

Итак, результаты диссертации представляются достоверными и научно обоснованными, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертация представляет собой законченную работу, которая соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»,

предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям, а её автор, Дурнев Михаил Васильевич, заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

главный научный сотрудник, заведующий отделом физики сверхпроводников

Института физики микроструктур РАН - филиала Федерального государственного

бюджетного научного учреждения «Федеральный исс

прикладной физики Российской академии наук» (ИП

А.С.Мельников

25 февраля 2025г.

телефон: +7 910 3929860, e-mail: melnikov@ipmras.ru.

Почтовый адрес: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ИФМ РАН.

"Подпись А.С. Мельникова удостоверяю"

Ученый секретарь Института физики микроструктур РАН— филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

кандидат физико-математ

Д.М.Гапонова