

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **БУДКИНА Григория Владимировича** «Фотогальванические эффекты и нелинейный транспорт в квантовых ямах и топологических изоляторах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Большой интерес к системам с пониженной размерностью обусловлен как достижениями современной технологии получения совершенных полупроводниковых гетероструктур, так и прикладными задачами, возникающими при миниатюризации элементов вычислительных и информационных систем. Более того, низкоразмерные системы открывают совершенно новые возможности в изучении новых фундаментальных явлений, связанных с размерным квантованием энергетического спектра носителей заряда. В то же время исследования нелинейного высокочастотного транспорта позволяют выявить и понять особенностей электронных, оптических и кинетических свойств низкоразмерных систем и позволяет получать информацию о симметричных свойствах изучаемых объектов, деталях энергетического спектра и механизмах рассеяния носителей заряда. На основании этого, считаю, что тема диссертационной работы Г.В. Будкина и сама работа, посвященная теоретическому исследованию фотогальванических и нелинейных высокочастотных явлений в низкоразмерных полупроводниковых структурах и топологических изоляторах, без сомнения является актуальной.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует цель работы, дает характеристику научной новизны и практической значимости работы, формулирует научные положения, выносимые на защиту, дает сведения об апробации работы и кратко излагает содержание диссертации.

Особенностью диссертации является отсутствие отдельной главы с обзором литературы. Современному состоянию исследований в каждой главе посвящен отдельный первый параграф.

В первой главе приводятся результаты теоретического исследования фотогальванических эффектов в асимметричных квантовых ямах. Второй и третий параграфы посвящены теоретическому исследованию фотогальванических

эффектов в квантовых ямах со структурной асимметрией в геометрии перпендикулярного плоскости квантовой ямы и наклонного магнитного поля, соответственно. Автором показано, что в обоих случаях линейный и циркулярный фототоки многократно увеличиваются в условиях, когда частота излучения близка к циклотронной частоте. Кроме того, в наклонном магнитном поле циркулярный фототок имеет дополнительный резонанс на частоте излучения равной удвоенной циклотронной частоте. В четвертом параграфе изучен механизм формирования фототока за счет релаксации энергии разогретых излучением электронов с участием акустических фононов. Здесь показано, что в условиях циклотронного резонанса эффективность разогрева электронного газа и величина тока увеличиваются.

Вторая глава посвящена исследованию фототоков в поверхностных слоях трехмерного топологического изолятора на основе напряженного теллурида ртути. После обзора текущего состояния исследований, автор описывает расчеты спектра электронных состояний в пленке $(01h)$ -HgTe, зажатой между слоями HgCdTe, выполненные в рамках шестизонной kP модели. Показано наличие поверхностных состояний внутри запрещенной зоны объемного деформированного HgTe. Теория, развитая в первой главе диссертации обобщена на случай дираковских фермионов на поверхности топологических изоляторов. Одним из наиболее значимых, с моей точки зрения, результатов являются, относящиеся к поверхностным фототокам. Автором показано, что возникновение фототоков в терагерцовом диапазоне связано с асимметрией рассеяния носителей заряда в магнитном поле.

Эффект увлечения двумерных носителей заряда фотонами в условиях циклотронного резонанса исследован в третьей главе диссертации. Микроскопическую теорию эффекта предваряет симметричный анализ. Автором показано, что фототок, индуцированный эффектом увлечения, усиливается в условиях циклотронного резонанса. Кроме того, зависимость фототока от магнитного поля содержит дополнительный резонансный вклад, если время релаксации импульса зависит от энергии Ферми. Это, в частности, дает возможность получать информацию о зависимости времени релаксации импульса от энергии, измеряя токи увлечения.

В четвертой главе диссертации автор исследует эффекты генерации спиновых и электрических фототоков в низкосимметричных квантовых ямах с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Рассмотрены две ситуации: параболического и линейного энергетического спектра носителей заряда. Автором показано, что из-за спин-зависимой части электрон-фононного взаимодействия энергетическая релаксация носителей, нагретых излучением, для различных спиновых подзон асимметрична, и вероятности испускания фононов для электронов с противоположными волновыми векторами различны, что приводит к генерации противоположно направленных электронных потоков в двух спиновых подзонах. Во внешнем магнитном поле за счет эффекта Зеемана возникает разбалансированность потоков в спиновых подзонах из-за их разной заселенности, и возникает ненулевой электрический ток.

В пятой главе диссертации разработана теория эффекта магнитного орбитального хруповика в двумерных структурах с латеральной магнитной сверхрешеткой на основе топологических изоляторов, графена и полупроводниковых гетероструктур. Автором получены выражения для вклада в ток, обусловленного эффектом Нернста-Эттингсгаузена в системах с линейной дисперсией при короткодействующем рассеянии и в системах с квадратичной дисперсией при кулоновском рассеянии. Убедительно продемонстрировано, что зависящие от поляризации фототоки присутствуют для любых механизмов упругого рассеяния, а их частотные зависимости различаются для систем с параболической и линейной дисперсией.

Из вышеизложенного также следует, что диссертация Г.В. Будкина представляет собой научную работу, результаты которой имеют практическую значимость. В частности, результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы при разработке излучателей и фотоприемников излучения терагерцового диапазона. Все полученные результаты являются новыми.

Полученные в данном диссертационном исследовании результаты представляют интерес для экспериментаторов и теоретиков, занимающихся

исследованиями низкоразмерных систем и, следовательно, имеют научную значимость.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В Главе 2 приведены результаты расчетов энергетического спектра напряженных пленок теллурида ртути и сравнение этих результатов с экспериментальными данными. При этом в расчетах использована величина встроенного электрического поля равная 0,5 кВ/см. Поскольку сам спектр и эффективные массы поверхностных состояний зависят от электрического поля, то неплохо было указать из каких соображений выбиралось именно это значение напряженности поля.
2. Положения пиков на зависимости фототока от магнитного поля на рис. 2.5 должны чувствовать электрическое поле E_z , как это следует из диссертационной работы. Анализ таких зависимостей, полученных на структурах с полевым электродом, в рамках разработанной автором модели сделал бы работу Г.В. Будкина еще лучше.
3. На стр. 72 диссертации написано, что вблизи точки зарядовой нейтральности электронные состояния в квантовых ямах описываются в изотропной модели согласно модели Берневига-Хьюза-Жанга. Отмеченная модель описывает закон дисперсии дырочных и электронных состояний вблизи дираковской точки, тогда как термин «зарядовая нейтральность» означает равенство концентраций положительно и отрицательно заряженных носителей безотносительно к виду энергетического спектра. Что имелось ввиду?

Сделанные замечания в целом не носят принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Будкина Григория Владимировича «Фотогальванические эффекты и нелинейный транспорт в квантовых ямах и топологических изоляторах» является законченным исследованием. Она выполнена на высоком уровне и представляет собой научную квалификационную работу, содержащую решение задачи, существенной для физики систем с пониженной размерностью.

Материалы диссертации опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, докладывались на российских и международных конференциях. Основные результаты работы достаточно полно отражены в публикациях и автореферате. Содержание автореферата соответствует положениям, представленным в диссертации.

Диссертация по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям пункта № 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Г.В. Будкин, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент,
директор Института естественных наук
и математики ФГАОУ ВО «УрФУ
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», доктор физ.-мат. наук

А.В. Германенко

Германенко Александр Викторович,
Доктор физико-математических наук, директор Института естественных наук и математики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
<http://www.urfu.ru/>
Email: alexander.germanenko@urfu.ru
Тел.: (343)389-97-03
Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния
<https://urfu.ru/ru/about/personal-pages/Personal/person/alexander.germanenko/>