



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**
имени
М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Тел.: 939-10-00, 203-65-65
Факс: 939-01-26

28.02.2018 № 345-18/013-03
На №

“Утверждаю”

Проректор Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

профессор

А.А. Федянин

“ 28 ” 2018 г.



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Девизоровой Жанны Алексеевны на тему:
«Интерфейсные эффекты в электронном спектре ограниченных полупроводников и
полуметаллов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико -
математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Экспериментальное и теоретическое исследование свойств материалов, характеризующихся дираковским законом дисперсии носителей заряда, является одной из наиболее быстро и динамично развивающихся областей современной физики конденсированного состояния. К данному классу объектов относятся графен, двумерные и трехмерные топологические изоляторы, вейлевские и дираковские полуметаллы. Особый интерес представляют поверхностные и краевые электронные состояния, образующиеся в этой ситуации на границе раздела материала с вакуумом, либо на гетероинтерфейсе. Эти состояния обладают в ряде случаев спиновой текстурой, которой потенциально можно управлять изменяя параметры системы, что важно для использования материалов дираковским спектром в устройствах спинтроники. Диссертация Ж.А. Девизоровой посвящена теоретическому исследованию свойств таких электронных состояний, что определяет актуальность работы.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех оригинальных глав, заключения с основными выводами работы, списка используемой литературы, в котором выделены работы автора диссертации, и приложения. Материал диссертации изложен на

99 страницах и содержит 18 рисунков, 2 таблицы и 125 наименований цитируемых источников.

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, поставлены конкретные задачи. Обсуждается научная новизна, практическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту.

Далее в диссертации следует обзор литературы по теме работы. Изложены известные теоретические и экспериментальные результаты по спиновому расщеплению спектра двумерных электронов в квантовых ямах на основе соединений A^3B^5 . Далее вводится понятие вейлевского полуметалла и дается обзор работ, посвященных как объемным свойствам этих материалов, так и необычным поверхностным состояниям в них. В заключение приводятся результаты работ по краевым состояниям в графене.

В первой из трех оригинальных глав исследуется влияние атомарно резкого гетероинтерфейса на спиновое расщепление 2D состояний в зоне проводимости гетероструктур на основе $(001) A^3B^5$ без магнитного поля и в наклонном магнитном поле, содержащем квантовую компоненту. Получено граничное условие, которое описывает атомарно резкую гетерограницу типа GaAs/AlGaAs с большим разрывом зоны проводимости, отсутствие центра инверсии в объемном кристалле, спин-орбитальное взаимодействие в объеме и на интерфейсе симметрии C_{2v} . Проанализировано влияние атомарно резкого и непроницаемого интерфейса на спиновое расщепление спектра двумерных электронов в несимметричных гетероструктурах на основе соединений $(001) A^3B^5$ в отсутствие магнитного поля. Показано, что спиновый гамильтониан по-прежнему представляет собой сумму термов Дрессельхауза и Бычкова-Рапшбы, однако соответствующие константы перенормированы за счет интерфейсного спин-орбитального взаимодействия. Из сравнения с экспериментом оценены величины интерфейсных перенормировок и показано, что они существенны. Имеющийся в литературе большой разброс экспериментальных данных по спиновым константам объясняется неполным учетом интерфейсного спин-орбитального взаимодействия. Вычислено спиновое расщепление электронных уровней Ландау на гетеропереходе типа GaAs/AlGaAs с атомарно резким гетероинтерфейсом. Показано, что интерфейсное спин-орбитальное взаимодействие не только значительно перенормирует компоненты тензора g -фактора, но и приводит к качественным изменениям в их зависимости от квантовой компоненты магнитного поля. Результаты качественно и количественно описывают экспериментальные данные по электронному парамагнитному резонансу в системе двумерных электронов, прижатых внутренним электрическим полем к одной гетерогранице в широкой квантовой яме GaAs/AlGaAs.

Во второй из оригинальных глав построена аналитическая модель поверхностных состояний в вейлевском полуметалле. Эта модель описывает экспериментальные данные и легко обобщается на наличие внешних полей. Основные полученные в данной главе результаты сводятся к следующему. Получено общее граничное условие для эффективных

волновых функций на поверхности вейлёвского полуметалла в двухдолинном приближении. Оно содержит два действительных феноменологических параметра. Один из них описывает внутридолинное, а другой – междолинное интерфейсное взаимодействие. Рассчитаны спектры поверхностных состояний в вейлевском полуметалле в двухдолинном приближении. Показано, что форма поверхностных состояний определяется соотношением между внутридолинным и междолинным интерфейсными параметрами. Продемонстрирована ключевая роль интерфейсного междолинного взаимодействия в образовании ферми-арок, которые наблюдались экспериментально. Качественно проанализировано взаимодействие между парами долин в вейлевском полуметалле в четырехдолинном приближении. Показано, что в зависимости от величины и соотношения между внутридолинным и междолинным интерфейсным взаимодействием, ферми-арка может соединять две близкие или удаленные точки зоны Бриллюэна.

Наконец, третья оригинальная глава посвящена рассмотрению интерфейсных эффектов для графеновой антиточки. Рассчитаны особенности локальной плотности состояний, отвечающие краевым состояниям на антиточке в графене. Вычислены энергетический спектр краевых состояний и сечение рассеяния электронов на заряженной антиточке в графене. Показано, что энергия краевых состояний увеличивается (уменьшается) при отрицательном (положительном) заряде антиточки. Исследовано, как изменяются положение и форма резонансов в зависимости сечения рассеяния от энергии при изменении заряда антиточки.

В заключении приведены основные результаты работы.

Результаты исследований, проведённых Ж.А. Девизоровой, представляют несомненный практический интерес. Они доказывают важность понимания свойств границ раздела материалов с дираковским спектром для создания новых электронных устройств, в том числе квантовых компьютеров. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), и в других институтах РАН и организациях Министерства образования и науки.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд замечаний и пожеланий:

1) Было бы весьма желательно явным образом описать, к каким последствиям для делаемых в гл.1 выводов может приводить не атомарная резкость гетероинтерфейса, которая всегда присутствует в реальных структурах.

2) По результатам, полученных для вейлевских полуметаллов, было бы важным описать, к каким потенциально экспериментально наблюдаемым эффектам (помимо спектров ARPES) могло бы приводить приведенное теоретическое рассмотрение.

3) То же самое относится к результатам, полученным в главе 3. В этом смысле гл.1 работы представляет приятное исключение, поскольку в ней рассмотрены результаты сравнения с экспериментальными данными.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Диссертация Ж.А. Девизоровой является законченной научно-квалификационной работой и содержит решение задач в области теоретических исследований свойств границ раздела материалов с дираковским энергетическим спектром носителей, что имеет важное значение для развития физики полупроводников. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации, научные результаты диссертации опубликованы в статьях автора в рецензируемых научных изданиях. В целом, диссертация Ж.А. Девизоровой удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доклад Ж.А. Девизоровой заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ. Отзыв подготовлен членом-корреспондентом РАН, профессором, д.ф.-м.н. Д.Р. Хохловым и утвержден на заседании кафедры 13 февраля 2018 г., протокол №1.

Заведующий кафедрой
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ
член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Д.Р. Хохлов

Дмитрий Ремович Хохлов
Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991
Тел. (495)-939-11-51
E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru