ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.136.01 (Д002.100.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ИМЕНИ Ю.А. ОСИПЬЯНА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №_____

решение диссертационного совета от 31.10.2023 № 10

О присуждении Ванькову Александру Борисовичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Оптическая спектроскопия сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле» по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния» принята к защите 19.06.2023 (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.136.01 (Д 002.100.02), созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), 142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 2, приказ Минобрнауки от 17.10.2019 № 965/нк.

Соискатель Ваньков Александр Борисович, 10 марта 1984 года рождения, в 2006 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», в 2009 году окончил аспирантуру ИФТТ РАН, диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Циклотронные спин-флип возбуждения в двумерных электронных системах в режиме квантового эффекта Холла» защитил в 2009 году в диссертационном совете Д 002.100.02, созданном на базе ИФТТ РАН. Работает старшим научным сотрудником в ИФТТ РАН.

Диссертация выполнена в Лаборатории неравновесных электронных процессов ИФТТ РАН.

Научного консультанта нет.

Официальные оппоненты:

Волков Владимир Александрович - д-р физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Отдел полупроводниковой электроники, главный научный сотрудник

Глазов Михаил Михайлович - д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН), Сектор теории квантовых когерентных явлений в твердом теле, ведущий научный сотрудник

Пудалов Владимир Моисеевич - д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Центр имени В.Л. Гинзбурга, главный научный сотрудник
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН) в своём положительном заключении, подписанном Чапликом Александром Владимировичем - доктором физ.-мат. наук, профессором, академиком РАН, главным научным сотрудником Лаборатории теоретической физики ИФП СО РАН и Квоном Зе Доном - доктором физ.-мат. наук, членом-корреспондентом РАН, заведующим Лабораторией физики низкоразмерных электронных систем ИФП СО РАН **указала**, что «Оценивая диссертацию в целом можно сказать, что благодаря ей в физике низкоразмерных электронных систем появилось ещё одно весьма интересное и, по-своему, глубокое исследование эффектов сильного межчастичного взаимодействия на примере ДЭС в полупроводниковых гетероструктурах MgZnO/ZnO, достаточно новой и вызывающей в настоящее время заметное внимание всех специалистов в области физики низкоразмерных систем», «Достоверность и обоснованность полученных диссертантом результатов очевидны»,

«Они вносят заметный вклад в физику конденсированного состояния», «Нет никаких сомнений, что по актуальности, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа Ванькова А.Б. «Оптическая спектроскопия сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Ваньков Александр Борисович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 40 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ в рецензируемых научных изданиях.

На автореферат диссертации поступили три положительных отзыва в которых отмечается, что работа является законченным научным исследованием, вносит существенный вклад в развитие физики двумерных электронных систем. По новизне, значимости и актуальности диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России к докторским диссертациям.

Отзывы на автореферат дали:

Голуб Леонид Евгеньевич (доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник Сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). Отзыв на автореферат положительный, имеется одно замечание про отсутствие обсуждения спин-орбитального расщепления в гетеропереходах ZnO/MgZnO.

Дикман Сергей Михайлович (кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории неравновесных электронных процессов ИФТТ РАН). Отзыв на автореферат положительный, имеется одно замечание про недостаточно подробные подписи к рисункам.

Махлин Юрий Генрихович (доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, заведующий Международной лабораторией физики конденсированного состояния

Национального исследовательского университета Высшая школа экономики). Отзыв на автореферат положительный, имеется два замечания: первое - про необходимость аналитических оценок для размерности редуцированного базиса и второе – про не всегда удачное использование речевых оборотов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

Официальные оппоненты являются крупными специалистами в области физики двумерных электронных систем. Все оппоненты имеют значительное число опубликованных работ в областях, общих по тематике с диссертацией.

В частности, официальные оппоненты Волков Владимир Александрович и Глазов Михаил Михайлович – ведущие физики-теоретики, общепризнанные эксперты в области физики конденсированного состояния, неравновесных процессов в низкоразмерных электронных системах, плазменных, спиновых и кинетических явлений. Официальный оппонент Пудалов Владимир Моисеевич – известный физик-экспериментатор, признанный специалист в области физики конденсированного состояния, специализирующийся на исследованиях сильно-коррелированных электронных систем, в том числе – двумерных ферми-жидкостей; является главным редактором журнала «Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики».

Ведущая организация - ИФП СО РАН - является одним из крупнейших и наиболее авторитетных в России центров по фундаментальным научным исследованиям и прикладным разработкам в области физики конденсированных сред, в том числе полупроводников и диэлектриков, физике низкоразмерных систем, оптоэлектроники, наноэлектроники.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получен ряд принципиально новых результатов, связанных с модифицированными свойствами двумерных электронных систем при больших значениях параметра Вигнера-Зейтса r_s (реализованных в работе на примере полупроводниковых структур на базе ZnO).

В частности, для магнитооптического исследования этих широкозонных полупроводников в ближнем УФ-диапазоне были реализованы спектроскопические

методики фотолюминесценции, резонансного неупругого рассеяния света, оптически детектируемого резонансного микроволнового поглощения. При малых квантующих магнитных полях показано влияние кулоновского взаимодействия на величину циклотронной массы электронов, а также на иерархию и энергетическую структуру межподзонных коллективных возбуждений. Основная часть исследований проведена в сильных магнитных полях – режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) с малыми факторами заполнения. Посредством изучения свойств коллективных спиновых возбуждений и спектров излучательной рекомбинации получены уникальные данные о многочастичных эффектах в энергии основного и возбужденных состояний ДЭС, а также механизмах спинового упорядочения.

Было установлено, что при высоких значениях параметра Вигнера-Зейтса r_s сильные кулоновские корреляции приводят к ослаблению обменных эффектов, была обнаружена значительная перенормировка спиновой жёсткости квантово-холловского ферромагнетика при $\nu=1$ до шкалы энергий, сопоставимых с циклотронной. Для этой задачи также были выполнены численные расчёты методом точной диагонализации для системы из конечного числа электронов. Полученные данные на качественном уровне согласуются с результатами эксперимента.

Реализован чисто оптический подход к исследованию ферромагнитных переходов вблизи состояний целочисленного КЭХ, позволяющий как явно зондировать спиновую поляризацию ДЭС, так и характеризовать фазовое расслоение. Построена фазовая диаграмма в координатах «электронная концентрация»-«угол наклона магнитного поля», из которой видно, что в изучаемых ДЭС при больших r_s~10 положение ферромагнитного перехода определяется не только величиной обменного взаимодействия, но и изменением за счет многочастичных эффектов таких параметров спектра как эффективная масса и величина g-фактора электронов. Проведено исследование термодинамической устойчивости фаз, условий образования доменов.

Исследованы коллективные возбуждения парамагнитной и ферромагнитной фаз в состоянии КЭХ с $\nu=2$, изучена их роль в механизме ферромагнитной неустойчивости. Оказалось, что к фазовому переходу приводят не одиночные спин-флип процессы, а более энергетически выгодные мульти-спин-флип возбуждения – они и представляют собой зародыши противоположной фазы. Экспериментально

измерены дисперсионные свойства спиновых возбуждений, а в расчётах методом точной диагонализации дополнительно показано наличие магниторотонных минимумов в дисперсии нижайших спиновых мод. В ферромагнитной фазе при $\nu=2$ экспериментально обнаружено макроскопическое накопление спиновых экситонов при резонансном фотовозбуждении, что проявилось в неравновесном усилении антистоксового рассеяния света.

При нецелочисленных факторах заполнения $1<\nu<3/2$ по поведению спиновых коллективных возбуждений в спектрах неупругого рассеяния света обнаружены свидетельства существования неколлинеарного магнитного порядка, то есть спиновых текстур. Это наблюдение неожиданно ввиду того, что для материальных параметров ДЭС в ZnO текстуры скирмионного типа энергетически крайне невыгодны. Для его объяснения изучено влияние на магнитный порядок плотности электронов в ДЭС, ориентации квантующего магнитного поля по отношению к плоскости ДЭС, температуры. На основе результатов численного моделирования предложено объяснение причин образования спиновых текстур – их образование происходит с вовлечением орбитальной степени свободы при близком расположении квазичастичных уровней Ландау с различными индексами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

В результате выполненных экспериментальных исследований обнаружен целый ряд эффектов, обусловленных большой величиной параметра взаимодействия в исследованных ДЭС. Часть этих эффектов удалось описать результатами численных расчетов, основанных на методе точной диагонализации для системы из конечного числа электронов. Метод точной диагонализации был модифицирован для учета смешивания электронных состояний на различных уровнях Ландау.

Оптимизация вычислений достигается за счёт алгоритма сокращения на несколько порядков базиса многочастичных конфигураций при конечном значении параметра смешивания. Оптимизированный вычислительный метод прекрасно себя зарекомендовал для расчетов энергетического спектра и других микроскопических характеристик ДЭС в состояниях целочисленного и дробного КЭХ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Установлены ключевые параметры квази-двумерных систем в одиночных гетеропереходах MgZnO/ZnO, включая масштабы подзонного размерного квантования и внутризонного энергетического спектра, включающего одночастичные и многочастичные вклады. Эти сведения необходимы для проектирования устройств оптоэлектроники и спинтроники на основе данных материалов. Полученные результаты расширяют понимание физики двумерных коллективных возбуждений, перенормировки параметров ферми-жидкостных квазичастиц, преобразования энергетического спектра квантово-холловских систем и также механизмов фазовых переходов в спиновом упорядочении при усилении роли кулоновского взаимодействия, которые могут быть реализованы и на других материальных платформах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

Корректностью постановки исследовательских задач; использованием экспериментальных методик, являющихся адекватными и эффективными для изучения рассматриваемых явлений; сопоставлением результатов эксперимента с теоретическими предсказаниями в тех редких случаях, когда предсказания существуют (например для перенормированного масштаба обменной энергии квантово-холловского ферромагнетика при r_s>>1), а также сопоставлением физического эксперимента с численным моделированием сильно взаимодействующей системы из малого числа электронов в режиме КЭХ, одинаково эффективного для случаев слабого и сильного кулоновского взаимодействия; апробацией результатов путём их публикации в ведущих международных рецензируемых журналах, докладов на российских и международных конференциях, обсуждения на семинарах в кругу специалистов.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач, выборе и реализации экспериментальных методик, проведении экспериментов, анализе полученных экспериментальных данных, разработке алгоритма вычислительной схемы точной диагонализации энергетического спектра многоэлектронных систем в режиме КЭХ,

необходимой для понимания происходящих процессов и сравнения с экспериментом. Соискатель подготовил и опубликовал 17 статей по теме диссертационной работы в ведущих рецензируемых журналах, а также представил результаты работы на многочисленных конференциях и семинарах.

Диссертационный совет заключает, что диссертация Ванькова А.Б. является самостоятельной завершенной научной работой, совокупность результатов которой можно квалифицировать как значительное научное достижение. Работа Ванькова А.Б. полностью отвечает всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

На заседании 31 октября 2023 г диссертационный совет принял решение присудить Ванькову А.Б. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 22 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 29 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» - 22, «против» - 0, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель
Диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук Левченко Александр Алексеевич

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор технических наук Курлов Владимир Николаевич

Дата 01 ноября 2023 г.