

О Т З Ы В

официального оппонента по диссертации Ванькова Александра Борисовича на тему «Оптическая спектроскопия сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы.

подавляющая часть устройств современной микроэлектроники основана на использовании двумерных или квазидвумерных систем электронов. Свойства таких систем и работа практических устройств традиционно описывались в рамках квазиклассических одноэлектронных представлений. Известно, однако, что эффекты межэлектронных корреляций становятся все более важными по мере снижения размерности электронных систем. В то время как в трехмерных системах многоэлектронные эффекты имеют масштаб малых поправок к квазиклассическим свойствам, в двумерных системах эффекты квантового взаимодействия – обмена и корреляций – становятся доминирующими.

В последние десятилетия были развиты теоретические средства описания многочастичных эффектов и, в принципе, открылась возможность теоретических расчетов эффектов межэлектронных корреляций. Однако, эти теоретические методы надежно работают лишь в случае слабых многочастичных эффектов. С другой стороны, благодаря прогрессу в технологии полупроводниковых и полуметаллических гетероструктур в последнее время удается создавать совершенные структуры с “тяжелыми” носителями заряда и с настолько низкой концентрацией, что квантовые эффекты взаимодействия в них играют главную роль. Экспериментальные исследования таких систем чрезвычайно актуальны, так как они прокладывают дорогу для развития теории и практики.

Диссертация А.Б. Ванькова посвящена исследованию коллективных эффектов межэлектронных взаимодействий в квантующем магнитном поле в двумерной системе электронов на основе ZnO/MgZnO. Носители заряда в исследуемых гетероструктурах имеют большую массу и высокую подвижность. Благодаря последнему обстоятельству, для исследований становится доступным режим низких концентраций и, следовательно, сильных межэлектронных корреляций, в котором наиболее ярко проявляются многочастичные эффекты. Т.о., выбранные объекты исследований являются удачной платформой для проведения фундаментальных исследований актуальной проблемы. С другой стороны, такие структуры являются перспективными для использования в наноэлектронике и спинтронике. По этим причинам, тема диссертации А.Б. Ванькова актуальна как для фундаментальной физики, так и для практических приложений.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация объемом 224 стр. состоит из Введения, семи глав с описанием результатов исследований, Заключение и списка литературы из 138 наименований. Она основана на 17 статьях автора, опубликованных в ведущих международных научных журналах.

Введение

Во введении содержатся все обязательные для докторской диссертации подразделы: актуальность тематики, цели работы, подробно описывается научная новизна в виде перечня полученных новых результатов, научная и практическая значимость, сформулирован личный вклад автора, описана апробация результатов и кратко изложена структура диссертации.

Глава 1 является вводной в рассматриваемую область. В этой главе автор знакомит читателя с одночастичными и коллективными возбуждениями в Ферми-жидкости, с типами процессов при взаимодействии электронов с фотонами. Излагаются основные сведения об эффектах в магнитном поле в условиях квантования уровней Ландау – магнитоэкситоны, коллективные спиновые возбуждения в парамагнитном и ферромагнитном состоянии, смешивание уровней Ландау, Ферми-жидкостные перенормировки параметров спектра квазичастиц.

В Главе 2 автор описывает экспериментальные методики - устройство исследуемых гетероструктур ZnO/MgZnO, методы измерений фотолюминесценции, резонансного неупругого рассеяния света. Хотя методики измерения резонансного неупругого рассеяния света в принципе и известны, но в данной диссертации они доведены автором до совершенства. Помимо измерения энергии рассеянных фотонов, варьируя углы наклона световодов к образцу автор измерял также и импульс, переданный от фотонов к электронам.

Глава 3 является теоретической; в ней автор подробно излагают используемые им методы численных расчетов. Описывается модифицированная схема точной диагонализации. С помощью этого метода, в частности, автор проводит численные расчеты распределения электронов по уровням Ландау и скачок Мигдала в распределении, в режиме целочисленного и дробного квантового эффекта Холла (КЭХ). Перестройка функции распределения анализируется в терминах рождения магнитоплазменных флуктуаций в структуре основного состояния. Рассматривается нетривиальная задача для системы с перекрытием и смешиванием уровней Ландау – нахождение иерархии многоэлектронных конфигураций на уровнях Ландау. Получены любопытные и неожиданные результаты - формирование особенностей в спектре спинового экситона и понижение его энергии. Установлено, что квантование Ландау подавляет амплитуду скачка Мигдала, который уменьшается квадратично по r_s , а также линейно по фактору заполнения ν . Выявлено, что главный вклад в эту перестройку функции распределения вносят магнитоплазменные возбуждения с нулевым суммарным импульсом. Еще более интересные и нетривиальные результаты получены при расчете дисперсии коллективных возбуждений в режиме дробного КЭХ

В Главе 4 описаны результаты экспериментальных исследований магнитоплазменных и межподзонных возбуждений двумя способами - изящным методом оптически детектируемого резонансного микроволнового поглощения и традиционным методом резонансного неупругого рассеяния. Важным результатом измерений первым методом является зарегистрированная зависимость циклотронной массы m^* от концентрации носителей. Однако, при интерпретации этих экспериментов объект исследований оказался более сложным чем простая модельная двумерная ферми-жидкость. Автору пришлось разделять влияние эффектов непараболичности зонной структуры от многочастичной перенормировки и поэтому полученные результаты скорее характеризуют материальную систему, чем многочастичную физику. Вторым методом, из неупругого резонансного рассеяния, автором измерен спектр

межподзонных коллективных и одночастичных возбуждений и их эволюция с изменением концентрации носителей. Из этих результатов извлечены деполаризационный и экситонный вклады в энергию возбуждений зарядовой и спиновой плотности и выявлены их парциальные роли.

В Главе 5 описаны исследования свойств коллективных спиновых возбуждений в состоянии КЭХ с полной спиновой поляризацией (ферромагнитное состояние при $\nu = 1$) при больших значениях параметра взаимодействия $r_s > 1$. Установлено, что обменная энергия в данном случае вносит вклад порядка $\hbar\omega_c$, что много меньше чем кулоновская энергия e^2/l_B . Данный результат был ранее получен теоретически, и также был эмпирически известен из предыдущих экспериментов, но экспериментально напрямую он был измерен и сопоставлен с расчетами впервые автором. Одновременно, с помощью резонансного неупругого рассеяния, автор измерил спиновую жесткость и установил, что она также намного ниже одночастичной, что согласуется со снижением обменной энергии.

В Главе 6 описаны магнитооптические исследования ферромагнитных переходов в режиме целочисленного КЭХ и границы устойчивости состояний при целочисленных факторах заполнения. Фазовые переходы с изменением спиновой поляризации контролировались варьированием зеемановской энергии путем наклона образца в магнитном поле; при этом наблюдалось резкое изменение зависимости от магнитного поля спектров фотолюминесценции (ФЛ) вблизи четных факторов заполнения. Одновременно наблюдались резкие изменения спектра неупругого резонансного рассеяния (НРС), свидетельствующие об изменении параметров спиновых коллективных возбуждений. Используя результаты измерений ФЛ и НРС автор построил фазовую диаграмму устойчивости ферромагнитного состояния, а также смог выявить доменную структуру и оценить соотношение площадей доменов разных фаз.

В Главе 7 рассмотрено влияние кулоновских корреляций на свойства спиновых коллективных возбуждений в парамагнитном состоянии КЭХ при факторе заполнения 2 с парамагнитным и ферромагнитным упорядочением. Особое внимание уделено наименьшим по энергии возбуждениям, которые определяют устойчивость фаз. Такими возбуждениями, связанными с переходом электронов на следующий уровень Ландау, являются магнитоплазмон и триплетная циклотронная спин-флип мода. Для возбуждений второго типа в данных экспериментах был измерен кулоновский вклад в полную энергию возбуждений. Отсюда установлено, что сочетание кулоновского и зеемановского вкладов сильно снижает энергию возбуждений по сравнению с циклотронной энергией - ожидаемым значением в невзаимодействующей системе. Еще одним неожиданным и интересным результатом является обнаружение ветви спектра спиновых экситонов с аномальной дисперсией в ферромагнитной фазе КЭХ вблизи фактора заполнения 2. Проведя численные расчеты автор установил, что возникновение этой ветви связано с магниторотонным минимумом.

Глава 8 посвящена обнаружению орбитальных спиновых текстур в двумерной системе электронов при отклонении от ферромагнитного состояния КЭХ с $\nu = 1$ и $3/2$. Из измерений методом НРС автор выявил свидетельства существования спиновых текстур. В этих условиях, помимо ферромагнитного спинового экситона, обнаружена низкоэнергетичная спиновая мода. В отличие от скирмионов, текстуры, возникающие в интервале факторов заполнения $1 - 3/2$, включают как спиновую, так и орбитальную

степень свободы. В диссертации показано, что в формировании нетривиальных спиновых текстур ключевую роль играют смешивание и пересечение уровней Ландау.

В Заключении сформулированы выводы диссертации.

Научная новизна и достоверность.

В результате проведенных автором экспериментальных исследований получено множество новых результатов, которые прошли апробацию в рецензируемых научных журналах и в докладах на конференциях. Отдельно хотелось бы отметить высокую теоретическую квалификацию автора: все полученные им экспериментальные результаты сопоставляются с аналитическими или численными теоретическими расчетами автора. Анализируется применимость и надежность различных аналитических методов расчета и теоретических подходов для исследованных систем. Такая синергия, безусловно, способствовала достижению достоверности полученных автором результатов.

Некоторые замечания по тексту диссертации.

- 1) Сравнение с результатами оптических исследований на других двумерных системах с сильным взаимодействием и высокой подвижностью (Si/SiGe и p-GaAs), к сожалению, отсутствует.
- 2) g-фактор Ланде. На стр. 36-37 утверждается, что измеренный из магнитотранспорта g-фактор не зависит от магнитного поля, со ссылками на работы [57-60]. Это верно только в предположении однородного Ферми-жидкостного состояния, однако выполнение этого предположения не доказано, а в цитированных работах проведены измерения на других материальных системах со значительно меньшим параметром взаимодействия. Для сильно-коррелированной двумерной системы, например, в работе [Phys. Rev. B 104, 035407 (2021)] была обнаружена зависимость спиновой восприимчивости от поля, которая связана с эффектами фазового расслоения. Да и в самой диссертации в главах 6 и 8 выявляются и изучаются эффекты фазового расслоения в коррелированной двумерной системе.
- 3) Об измерениях в наклонном поле. Важную роль в исследованиях автора играет наклон поля относительно плоскости двумерной структуры. Эта методика использована для изучения переходов РМ-ФМ в т.н. “квантовохольном” состоянии. Однако, при наклоне поля модифицируется орбитальная часть волновой функции электронов, а также увеличивается частота рассеяния электронов на шероховатостях интерфейса. В результате, при наклоне поля обычно падает подвижность, увеличивается перекрытие и смешивание уровней Ландау. Изменение подвижности в наклонном поле не учитывается автором при анализе, хотя такие измерения нетрудно было бы провести, изучая слабую локализацию в наклонном поле. Данный эффект, возможно, смог бы объяснить сдвиг границы ФМ-РМ в сторону более высоких концентраций при наклоне поля к 2D плоскости.
- 4) О рисунках:
Рис. 7.5: На каждой из изображенных 3х ветвей есть по 4 измеренных точки, погрешности которых не указаны. Поэтому обсуждение на стр. 166 того, к какой концентрации стремится эта зависимость (1×10^{11} или $1.8 \times 10^{11}/\text{см}^2$) - не имеет

экспериментального основания, так как в пределах погрешности экстраполяция дает примерно одинаковые значения.

Рис. 1.4. На стр.17 обсуждаются одночастичные возбуждения и коллективные возбуждения. Но в Ферми-жидкости важны еще и парные возбуждения. Они не упомянуты в тексте и их спектр отсутствует на Рис. 1.4.

Рис. 1.9а (стр.39) является сложным; в тексте не описано, что на нем изображено.

Рис. 5.6 (стр. 124). Данные на этом рисунке пересчитаны из Рис. 5.5, но на Рис.5.6 имеются 7 точек с $q \neq 0$, а на исходном рисунке 5.5b есть только 5 кривых.

5) Об осцилляциях Шубникова-де Гааза (ШдГ) и магнитотранспортных данных. На стр.59 упомянуто, что низкотемпературная подвижность определялась по осцилляциям ШдГ, но не объяснено, как именно.

На Рис. 2.3с (стр.65-66) показаны осцилляции ШдГ из измерений транспорта в магнитном поле. Поскольку в исследуемых образцах контакты не делались (как написано на стр. 59), то неясно, являются ли эти данные результатами измерений самого автора или других исследователей (если последнее, то нет ссылки).

Аналогичный вопрос возникает и при чтении текста на стр.96, где написано "Для всех изученных образцов время релаксации электронов по импульсу (30-50пс) хорошо согласуется с временами релаксации, извлеченными из магнитотранспортных данных". Если это были бесконтактные измерения импеданса, то их методику следовало описать.

Кроме того, определение времени релаксации из транспортных и магнитотранспортных данных в сильно-коррелированной системе является достаточно деликатной процедурой, которая должна учитывать квантовые эффекты при экстраполяции проводимости к нулевой температуре. К сожалению, в диссертации об этом ничего не написано.

6) О методике СВЧ измерений. К сожалению, эта методика скудно описана. В тексте есть несколько предложений, но нет ни одного рисунка. Неясность иллюстрируется фразой автора на стр.95: "Образец устанавливается на конце большого микроволнового волновода".

Диссертация, в целом, написана неплохим русским литературным языком, но все же в тексте имеются отдельные жаргонные термины, например:

"окололинейно" (стр.8, 10, 35); *"переигрывание ключевых энергетических масштабов"* (стр. 138, 142, 144); *"спайки магнитосопротивления"* (стр. 144, 150, 154); *"верхняя половина электронов"* (стр. 166); *"много загадок нащупывается"* (стр. 204).

Не всюду также выдержаны нормы русского языка, кое-где страдает точность выражения мыслей автором. Встречаются такие фразы:

"Несмотря на... удивляет картина пересечений..." (стр. 57); "Предполагая аддитивную структуру, это значит вычитание..." (стр. 116); "было необходимо проводить сканирование поля, а результаты показаны на Рис. 4.2а" (стр. 96); "энергия ... возбуждения будет представлять собой волновой пакет" (стр. 129). Во фразе "Наблюдение ...служит семафором"(стр.41-42) явно нарушена причинно-следственная связь.

Сделанные замечания, однако, нисколько не умаляют моей общей высокой оценки диссертации, представляющей собой выдающееся исследование, в котором рассматриваются не решенные до сих пор никем трудные, но актуальные задачи. Диссертационная работа вносит существенный вклад в физику сильно-коррелированных двумерных систем электронов.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывает сомнений. Сделанные автором выводы и заключения полностью обоснованы результатами, измеренными автором различными методами и подтвержденными расчетами. Своей диссертационной работой автор продемонстрировал, что он является достойным учеником и продолжателем школы Владислава Борисовича Тимофеева и Игоря Владимировича Кукушкина.

Результаты работы могут быть использованы в ведущих научных центрах, таких как ИФП СО РАН (Новосибирск), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФВД РАН, ИФТТ РАН, ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Казанский ФТИ им. Е. К. Завойского РАН, Институт физики металлов УрОРАН, Институт физики СО РАН (Красноярск), Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Практическая значимость диссертационной работы связана с возможностью использования полученных автором результатов для разработки новых устройств нанoeлектроники и спинтроники. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты работы полностью и своевременно опубликованы в 17 статьях в ведущих научных журналах и докладывались автором на многих российских и международных конференциях.

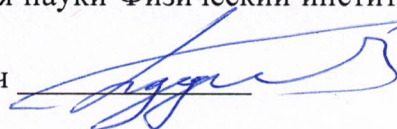
Работа Ванькова А. Б. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности «Физика конденсированного состояния» (1.3.8) и отвечает требованиям п.п. 2, 4, 5, 9, 11 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 №842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Ваньков Александр Борисович, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук по специальности 1.3.10 (01.04.09) – «Физика низких температур»,

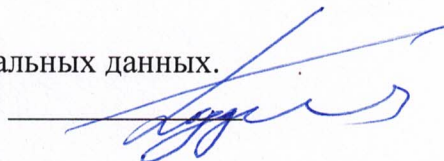
член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Центра им. В.Л. Гинзбурга
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт
имени П. Н. Лебедева РАН,

Пудалов Владимир Моисеевич
«9» октября 2023 г.



Согласен на обработку персональных данных.

Пудалов Владимир Моисеевич
«9» октября 2023 г.



Подпись Пудалова Владимира Моисеевича заверяю:

Ученый секретарь, заместитель директора по научной работе
Кандидат физ.-мат. наук,



Колобов Андрей Владимирович

Контактные данные:

+7(903)2289611, pudalov@lebedev.ru

Адрес места работы: Москва, Ленинский проспект, д.53