ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

ИНН 7802072267/КПП 780201001
ОКПО 02698463
ОГРН 1037804006998

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Кайсина Бориса Дмитриевича «Коллективные возбуждения в сильнокоррелированных двумерных электронных системах в гетероструктурах ZnO/MgZnO», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

В диссертации Кайсина Б. Д. рассматривается ряд актуальных физических задач в области свойств сильновзаимодействующих двумерных электронных систем (ДЭС) в полупроводниковых гетероструктурах. Одна из задач связана с исследованием ферромагнитной неустойчивости при целочисленных факторах заполнения в режиме квантового эффекта Холла. Данный эффект в пределе бесконечных факторов заполнения является Стонеровской неустойчивостью. Экспериментальные результаты, поясняющие микроскопический механизм формирования ферромагнитной фазы в данных условиях, на сегодняшний день крайне скудны. Эта задача была решена в диссертационной работе Б. Д. Кайсина. Другая задача связана с исследованием перенормировки обменного взаимодействия, было показано кардинальное различие в масштабах обменной энергии в сильновзаимодействующих и слабовзаимодействующих ДЭС. Данный факт позволяет сохранять привычную картину квазичастиц на уровнях Ландау при моделировании коллективных возбуждений в системах с сильным межчастичным взаимодействием. Еще одна задача связана с исследованием термодинамики квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2 в условиях вырождения спиновых подуровней. Условие термодинамической устойчивости в данном случае, значительно отличается от случая ферромагнитного состояния при факторе заполнения 1. Это условие было подробно исследовано в данной работе. Исходя из сказанного, **актуальность** диссертации Кайсина Б. Д не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснована актуальность поставленных задач, сформулирована цель работы, перечислены основные результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту. Также во введении обсуждается научная и практическая значимость работы, даются сведения о публикации результатов, составляющих содержание диссертации, докладах по теме работы на конференциях и семинарах, сформулирован личный вклад автора в работу.

Первая глава диссертации содержит обзор актуальной научной литературы по изучаемым проблемам. В начале главы приведены общие сведения о спектре возбуждений в ДЭС и о влиянии нелокальности волновой функции вдоль направления роста гетероструктуры на межчастичное взаимодействие. Рассматриваются эффекты, наблюдаемые в магнитном поле, такие как квантовый эффект Холла и ферромагнитная неустойчивость при целочисленных факторах заполнения. Приводятся сведения о методах изготовления, физических параметрах и особенностях исследуемых гетероструктур ZnO/MgZnO.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных образцов и методик. Исследования проводились методом резонансного неупругого рассеяния света, что позволяло анализировать спектры коллективных возбуждений и их дисперсии. Для изучения многочастичных эффектов эксперименты проводились на ДЭС с сильным межчастичным взаимодействием на основе высококачественных гетероструктур ZnO/MgZnO, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Также приводится подробное описание экспериментальной установки и оптической схемы используемых в работе.

Третья глава посвящена исследованию спиновой поляризации сильновзаимодействующих ДЭС в режиме квантового эффекта Холла. Было исследовано три межподзонных возбуждения: зарядовой плотности, спиновой плотности и одночастичное возбуждение. Были установлены многочастичные вклады в энергию коллективных возбуждений. Показано, что возбуждение зарядовой плотности может служить детектором спиновой поляризации сильновзаимодействующей ДЭС в режиме квантового эффекта Холла. Также по спектрам внутриподзонных спиновых возбуждений изучена деполяризация и термодинамическая устойчивость квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 1.

В **четвёртой главе** изучается явление ферромагнитной неустойчивости в режиме квантового эффекта Холла. Было показано, что наклон ДЭС относительно магнитного поля способствует формированию ферромагнитной фазы поскольку приводит к уменьшению одночастичной щели над основным состоянием. Получена фазовая диаграмма квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2. Показано, что ферромагнитный переход наступает из-за обнуления многочастичной энергетической щели над основным состоянием, к которому приводит доменирования отрицательного обменного вклада над одночастичными в энергию коллективного спинового возбуждения. Исследована термодинамика квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2. Показано, что термодинамическая устойчивость ферромагнитного состояния определяется кулоновской энергией формирования доменных стенок, образующихся в условиях вырождения спиновых подуровней.

Пятая глава посвящена изучению обменного взаимодействия в сильнокоррелированных ДЭС при факторе заполнения 1. Было показано, что в данных условиях обменная энергия претерпевает сильную перенормировку. Ее масштаб по порядку величины оказывается близким к циклотронной энергии и имеет линейную зависимость от концентрации. Данный результат значительно отличается от случая слабовзаимодействующих систем, где зависимость от концентрации является линейной, а масштаб обменной энергии соответствует характерной кулоновской энергии на магнитной длине.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что энергия межподзонного возбуждения зарядовой плотности может выступать в роли детектора спиновой поляризации сильновзаимодействующей ДЭС в режиме квантового эффекта Холла.

2. Исследован парамагнитный - ферромагнитный фазовый переход при целочисленных факторах заполнения. Показано, что ферромагнитный переход наступает из-за обнуления многочастичной энергетической щели над основным состоянием.

Получена фазовая диаграмма квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2.

3. Исследована термодинамика ферромагнитного спинового упорядочения основного состояния при факторах заполнения 1 и 2. Показано, что термодинамическая устойчивость фазы при факторе заполнения 1 определяется зеемановской энергетической щелью над основным состоянием, а при факторе заполнения 2 кулоновской энергией формирования доменных стенок.

4. Исследована перенормировка обменной энергии квантов-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 1. Показано, что по масштабу величины обменное взаимодействие в сильнокоррелированных системах оказывается близким к циклотронной энергии и имеет линейную зависимость от концентрации электронов в ДЭС.

Описанные в диссертации результаты являются **новыми и научно значимыми**, так как они получены впервые и представляют собой фундаментальный исследовательский интерес для изучения свойств сильновзаимодействующих ДЭС.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **корректными и обоснованными** в силу их всесторонней экспериментальной проверки. Также необходимо отметить хорошее согласие результатов эксперимента с теорией в тех случаях, когда такая теория существует. Материал, представленный в диссертации, изложен ясно и последовательно. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, были представлены на российских конференциях и семинарах. Цели и задачи, поставленные в работе, полностью осуществлены. Автором изучены и анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов по вопросам теории и экспериментальных исследований двумерных электронных возбуждений. Список цитируемой литературы содержит 84 наименования. **Автореферат** правильно и полно передаёт содержание диссертации. Характеризуя работу в целом, следует отметить её высочайший научный и методический уровень выполнения, большой объем исследований, большое число новых экспериментальных результатов и выводов, цельность и единство тематики.

Вместе с тем, к диссертации имеется ряд замечаний, которые в основном касаются оформления и представления результатов:

1. В экспериментах по исследованию коллективных возбуждений в сильнокоррелированных двумерных электронных системах в гетероструктурах ZnO/MgZnO использовалась чрезвычайно малая плотность энергии накачки. Тем не менее, следовало бы продемонстрировать экспериментально, что такая накачка не нагревает систему и не влияет на концентрацию носителей заряда.
2. При описании образцов не указана ширина треугольного потенциала на гетерогранице ZnO/MgZnO и не проведено сравнение магнитной длины (компоненты продольного магнитного поля) с шириной этого потенциала. Это важно, поскольку при определённых условиях продольная компонента магнитного поля могла бы повлиять на спектр размерного квантования.
3. В работе описаны поляризационные характеристики спектров рамановского рассеяния света на спиновой и зарядовой плотности. К сожалению, поляризационные ха-

рактеристики неупругого рассеяния света на спиновых возбуждениях и циклотрон спин-флип возбуждениях не представлены.

4. Нет наименования у оси ординат на рисунке 3.4. А на рисунках 4.5, 4.6, 4.8 вместо единиц измерения (arb. units) используется (a.u.). На рисунке 4.5 стрелка направленная вверх указывает на особенность в спектре, т.е. на спектральную линию, в то время как, стрелка направленная вниз указывает на непонятно что.
5. На странице 54 приведено неправильное неравенство. Вместо ($\nu \leq 2$) должно быть ($\nu \geq 2$).
6. Желательно более детально описывать выводы по каждой главе диссертации.

Перечисленные выше замечания носят рекомендательный характер и никоим образом не снижают общей высокой оценки работы. Диссертационная работа Кайсина Бориса Дмитриевича «Коллективные возбуждения в сильнокоррелированных двумерных электронных системах в гетероструктурах ZnO/MgZnO» является законченным научным исследованием и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор Кайсин Борис Дмитриевич, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», ведущий научный сотрудник Лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках спиновые Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

«17» мая 2021 года Сапега Виктор Федорович

Согласен на обработку персональных данных

«17» мая 2021 года Сапега В. Ф.

Подпись Сапеги В.Ф. заверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

к.ф.-м.н. Патров М. И.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

Телефон: +7(812) 292-73-42, e-mail:

sapega.dnm@mail.ioffe.ru