

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Бориса Дмитриевича Кайсина «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».

Изучение многочастичных эффектов в двумерных электронных системах (ДЭС) является важной темой в области физики конденсированного состояния. Прогресс в изготовлении гетероструктур на основе оксида цинка методом молекулярно-лучевой эпитаксии позволил получать сильновоздействующие ДЭС, обладающие уникальными параметрами и одновременно высокой степенью частоты. С точки зрения фундаментальных исследований, такие системы представляют собой гибкий и удобный объект для наблюдения новых физических явлений. Так, ранее в данных системах наблюдался ряд нетривиальных коллективных явлений, таких как ферромагнитная неустойчивость и дробный квантовый эффект Холла с необычными факторами заполнения. Подавляющее число экспериментальных исследований ДЭС в структурах ZnO/MgZnO выполнены магнитотранспортными методами, имеющими ряд ограничений. Применяемая в диссертационной работе Кайсина Б.Д. методика неупругого рассеяния света имеет значительные преимущества, так она позволяет напрямую зондировать спектры коллективных возбуждений и их дисперсии. Исследования спектра коллективных возбуждений в ряде случаев необходимо для выявления микроскопического механизма и физической природы коллективных явлений. Такие исследования были выполнены в диссертационной работе Кайсина Б.Д., а полученные результаты обуславливают ее высокую **актуальность**.

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

Во **введении** обосновывается актуальность поставленных задач, формулируются цели и обсуждается научная новизна диссертационной работы и практическая значимость, перечисляются основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о методах исследований, степени достоверности и апробации полученных результатов, публикациях, личном вкладе автора, а также структура и объем диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научных работ по теме диссертации. Приводятся основные сведения о коллективных возбуждениях в двумерных электронных системах в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ). Рассматриваются экспериментальные результаты по наблюдению ферромагнитной неустойчивости при целочисленных факторах заполнения. Описывается процесс формирования двумерной системы в структурах ZnO/MgZnO.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной методики и образцов. Подробно описывается метод неупругого рассеяния света, приведены основные характеристики для исследуемых в диссертационной работе структур ZnO/MgZnO. Также приводится подробное описание экспериментальной установки и используемых методов измерений.

В **третьей главе** описываются методы исследования спиновой поляризации двумерной электронной системы в магнитном поле. Было показано, что спиновая поляризация может

быть охарактеризована с помощью спектров неупругого рассеяния света на коллективном межподзонном возбуждении зарядовой плотности и внутривозонном спиновом возбуждении. Обнаружено, что при переходе от спин-неполяризованного основного состояния при факторе заполнения 2 к спин-поляризованному при факторе заполнения 1 энергия возбуждения зарядовой плотности претерпевает значительное изменение, что связано с изменением вклада обменной энергии. Данный факт позволяет рассматривать энергию этого возбуждения как детектор спиновой поляризации. По спектрам спиновых возбуждений изучена деполяризация и термодинамическая устойчивость квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 1.

Четвёртая глава посвящена изучению ферромагнитной неустойчивости при целочисленных факторах заполнения в сильно взаимодействующих ДЭС. Детектирование ферромагнитного перехода при факторе заполнения 2 осуществлялось по спектрам двумерной люминесценции и спектрам неупругого рассеяния света на спиновом возбуждении. Было показано, что причиной ферромагнитной неустойчивости служит исчезновение многочастичной энергетической щели над основным состоянием, которая определяется нижайшим по энергии коллективным возбуждением. Также показано, что фазовый переход сопровождается формированием доменной структуры основного состояния с доменами противоположных фаз. Построена фазовая диаграмма парамагнитного - ферромагнитного состояния при факторе заполнения 2. Проведено исследование термодинамической устойчивости квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2 в условиях вырождения спиновых подуровней. Было показано, что устойчивость фазы определяется кулоновской энергией формирования доменных стенок

В **пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований по изучению перенормировки обменного взаимодействия при факторе заполнения 1. Величина обменного взаимодействия была извлечена из энергии циклотронного спин-флип возбуждения. Показано, что в сильно взаимодействующих ДЭС обменная энергия имеет масштаб циклотронной энергии, а ее зависимость от концентрации близка к линейной. Данный результат значительно отличается от случая слабо взаимодействующих ДЭС, в которых обменная энергия имеет корневую зависимость от концентрации, а по масштабу величины равна характерной кулоновской энергии на магнитной длине.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты заключаются в следующем:

1. Исследованы межподзонные возбуждения зарядовой и спиновой плотности в ДЭС с сильным межчастичным взаимодействием. Показано, что энергия межподзонного возбуждения зарядовой плотности может служить детектором спиновой поляризации в сильнокоррелированных системах.
2. Исследована ферромагнитная неустойчивость в сильно взаимодействующих системах в режиме КЭХ. Показано, что ферромагнитный переход сопровождается формированием доменной структуры основного состояния с доменами противоположных фаз. Установлено, что к ферромагнитной неустойчивости приводит исчезновение многочастичной энергетической щели над основным состоянием, которая определяется нижайшим по энергии коллективным возбуждением.

3. Исследована термодинамика квантово-холловского ферромагнетика при факторах заполнения 1 и 2. Показано, что при факторе заполнения 1 термодинамическая устойчивость ферромагнитного состояния определяется зеемановской энергией расщепления спиновых подуровней, а при факторе заполнения 2 - кулоновской энергией формирования доменных стенок.
4. Исследована перенормировка обменного взаимодействия в системах с сильным межчастичным взаимодействием в режиме квантового эффекта Холла при факторе заполнения 1. Показано, что в данных условиях обменная энергия имеет масштаб циклотронной энергии, а ее зависимость от концентрации близка к линейной.

Результаты, описанные в диссертации Кайсина Б.Д., получены впервые, являются **новыми и научно значимыми** для решения актуальных задач современной физики конденсированного состояния.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **достоверными и обоснованными** в силу их всесторонней экспериментальной проверки. Важно отметить хорошее согласие результатов эксперимента. 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, поставленные в работе, полностью достигнуты. Автореферат правильно и полно передает содержание диссертации.

Тем не менее, текст диссертации вызывает ряд вопросов.

1. В разделе 4.1 говорится о том, что ферромагнитный переход детектировался по спектрам двумерной фотолюминесценции приведенным на рисунках 4.1-4.3, при этом не указано как именно по данным спектрам была установлена спиновая поляризация основного состояния. Каким оптическим переходам соответствуют данные спектры, и как по ним можно установить спиновую поляризацию системы?
2. В разделе 4.2 было показано, что причиной фазового перехода от парамагнитного спинового упорядочения на факторе заполнения 2 к ферромагнитному является обнуление многочастичной щели, обусловленной нижайшим по энергии возбуждением - циклотронным спин-флип экситоном. Однако не было сказано, что служит причиной обратного перехода от ферромагнитной фазы к парамагнитной, какое возбуждение формирует энергетическую щель над основным состоянием при ферромагнитном упорядочении спиновой подсистемы?
3. В разделе 3.3 приводятся исследования по измерению термодинамической устойчивости квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 1. Измерения проводились до температуры 4.2К, однако был сделан вывод, что устойчивость определяется энергией Зеемана, которая имеет масштаб 10-15К. На каком основании был сделан такой вывод?

Перечисленные выше замечания не имеют принципиального характера и никоим образом не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Кайсина Б.Д. выполнена на очень высоком уровне и представляет несомненный физический интерес.

Считаю, что диссертационная работа Кайсина Бориса Дмитриевича «Коллективные возбуждения в сильнокоррелированных двумерных электронных системах в гетероструктурах ZnO/MgZnO» представляет собой законченную научно-

исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современной физики конденсированного состояния тему. Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Кайсин Борис Дмитриевич, 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», главный научный сотрудник Лаборатории методов получения тонких пленок и пленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Волков Владимир Александрович

«18» мая 2021 года

Согласен на обработку персональных данных.

Волков В. А.

«18» мая 2021 года

Подпись Волкова В.А. заверяю.

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

к.ф.-м.н.



Чусов И. И.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 125009, Россия, Москва, ул. Моховая д. 11 к. 7

Телефон: +7 (495) 629-35-74

e-mail: yova@mail.cplire.ru