

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Института спектроскопии РАН

профессор Задков В.Н.

« 11 »



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Кайсина Бориса Дмитриевича «Коллективные возбуждения в сильнокоррелированных двумерных электронных системах в гетероструктурах ZnO/MgZnO», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

В последние десятилетия экспериментальное изучение свойств сильно-коррелированных двумерных электронных систем привлекает всё большее внимание со стороны научного сообщества. С фундаментальной точки зрения, этот интерес мотивирован богатым спектром нетривиальных физических явлений, таких как дробный квантовый эффект Холла, Вигнеровская кристаллизация, Стонеровская неустойчивость. Кроме того, недавний прогресс в методологии роста полупроводниковых гетероструктур позволил получать не только высококачественные структуры с большой подвижностью электронов в двумерном канале и сильным межчастичным взаимодействием, но и создавать на их основе системы с уникальными свойствами. К таким примерам относятся сильно коррелированные двумерные электронные системы на основе гетероструктур ZnO/MgZnO.

Исследованию многочастичных явлений в низкоразмерных структурах посвящено колоссальное количество современных научных работ. Объектом изучения данной диссертации являются эффекты, вызванные межчастичным взаимодействием, а их исследование проводится посредством анализа спектра коллективных возбуждений. Спектры

коллективных возбуждений в двумерных электронных системах несут уникальную информацию об основном состоянии системы, ее спиновой поляризации, а также о масштабе многочастичных энергетических членов, которые обуславливают дисперсионные законы данных возбуждений. Анализ структуры возбуждений позволяет выявить физическую природу нетривиальных явлений исследуемых в данной работе. Полученные результаты обуславливают высокую **актуальность** диссертационной работы и представляют фундаментальный интерес для изучения сильно коррелированных систем.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении рассматриваются актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Приводятся сведения о личном вкладе автора, апробации результатов (доклады на конференциях), публикациях в рецензируемых журналах, описывается структура и объём диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований спектра возбуждений двумерных электронных систем в отсутствие магнитного поля и в пределе сильного магнитного поля. Рассматриваются сильновзаимодействующие системы на основе гетероструктур ZnO/MgZnO и ранее наблюдаемые в них коллективные явления, такие как дробный квантовый эффект Холла, ферромагнитная неустойчивость и перенормировка спиновой восприимчивости.

Во второй главе приводится описание экспериментальных образцов и методики измерений. Приведены параметры исследуемых структур, представлены теоретические основы метода неупругого рассеяния света. Подробно описана экспериментальная установка и оптическая схема измерений, также приведены характеристики используемых оптических элементов.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию спиновой поляризации двумерных электронных систем на основе ZnO/MgZnO в режиме квантового эффекта Холла. Было показано, что в роли детектора спиновой поляризации может выступать межподзонное возбуждение зарядовой плотности. Энергия данного коллективного возбуждения при переходе из спин неполяризованного основного состояния при факторах заполнения больше 2 в спин поляризованное при факторе заполнения 1 претерпевает значительное изменение, детектируя которое можно сделать вывод о спиновой поляризации системы. Также было показано, что в качестве меры спиновой поляризации может выступать интенсивность

спектральной линии спинового возбуждения, которое представляет собой волну, образованную переходом электронов внутри одного уровня Ландау. По спектрам данного возбуждения была изучена спиновая деполяризация при отклонении от фактора заполнения 1 и термодинамическая устойчивость квантово-холловского ферромагнетика. Было показано, что устойчивость ферромагнитной фазы в данных условиях определяется Зеемановской энергией расщепления спиновых подуровней.

В четвертой главе представлены результаты по исследованию ферромагнитной неустойчивости при факторе заполнения уровней Ландау 2. Было показано, что переключение основного состояния из парамагнитной фазы в ферромагнитную наступает вследствие смятения нижайшего по энергии коллективного возбуждения, которое приводит к обнулению многочастичной энергетической щели над основным состоянием. Было показано, что ферромагнитный переход в условиях вырождения спиновых подуровней происходит с образованием доменной структуры с доменами противоположных фаз. Анализируя спектры неупругого рассеяния света на коллективных возбуждениях и спектры двумерной фотолюминесценции, была построена фазовая диаграмма квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2. Также была исследована термодинамическая устойчивость ферромагнитной фазы. Было показано, что в данном случае устойчивость фазы определяется температурой формирования доменных стенок, которая имеет кулоновскую природу.

Пятая глава посвящена изучению перенормировки обменного взаимодействия в режиме квантового эффекта Холла при факторе заполнения 1. Энергия обменного взаимодействия была установлена из спектров неупругого рассеяния света на циклотронном спин-флип возбуждении. Было показано, что для систем с высоким параметром взаимодействия, данная энергия оказывается по порядку величины равной циклотронной энергии и имеет линейную зависимость от концентрации электронов в двумерной системе. Данная зависимость сильно отличается от зависимости в слабо взаимодействующих системах, где обменная энергия по порядку величины равна характерной кулоновской энергии на магнитной длине и имеет корневую зависимость от концентрации.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Наибольшую **научную значимость** в данном диссертационном исследовании представляют следующие полученные в ней результаты:

1. Методом неупругого рассеяния света в системах с сильным межчастичным взаимодействием исследована ферромагнитная неустойчивость в режиме квантового эффекта Холла. Получена фазовая диаграмма парамагнитного - ферромагнитного состояния при факторе заполнения 2

2. Показано, что ферромагнитная неустойчивость возникает вследствие смягчения нижайшего коллективного возбуждения. Данное смягчение приводит к обнулению многочастичной энергетической щели над основным состоянием, что приводит к фазовому переходу.
3. Изучена термодинамическая устойчивость квантово-холловского ферромагнетика при факторах заполнения 1 и 2. Показано, что устойчивость ферромагнитной фазы в первом случае определяется Зеемановской энергией расщепления спиновых подуровней, а в последнем - кулоновской энергией формирования доменных стенок.
4. Исследована перенормировка обменного взаимодействия в системах с сильными межчастичными корреляциями в режиме квантового эффекта Холла при факторе заполнения 1. Показано, что в данном случае обменная энергия имеет масштаб циклотронной энергии и растет линейно с концентрацией электронов в двумерном канале.

Практическая значимость работы заключается в подробном исследовании спиновой конфигурации основного состояния сильно взаимодействующих двумерных электронных систем, а также спектров коллективных возбуждений. Данные результаты могут найти применение при проектировании устройств спинтроники и оптоэлектроники.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. Во введении к главе 4 говорится, что одночастичная модель пересечения спиновых подуровней неприменима для описания ферромагнитного перехода в системах с сильным взаимодействием. Однако на вставке к рисунку 4.4 приводятся зависимость спиновой восприимчивости от концентрации электронов в двумерном канале, вычисленная из одночастичного выражения 4.1, которое описывает пересечение спиновых подуровней в невзаимодействующих системах. На каком основании данная модель применяется в случае сильновзаимодействующих систем?

Связанный с этим вопрос. В ряде мест диссертации дается интерпретация наблюдаемых спектральных линий и их изменений в терминах электронных переходов между конкретными уровнями Ландау. В то же время, величина кулоновского взаимодействия в системе настолько велика, что большую роль должно играть смешивание уровней Ландау, так что возбуждаемые при неупругом рассеянии света переходы должны иметь существенно многочастичную природу. Что же имеется в виду?

2. На рисунке 4.9а представлены спектры неупругого рассеяния света на циклотронном спин-флип возбуждении в парамагнитной фазе вблизи фактора заполнения 2, на этом же спектре присутствует спектральная линия спинового экситона, хотя ранее было сказано, что при парамагнитном упорядочении спиновой подсистемы данное возбуждение отсутствует. Нет ли здесь противоречий с описанными в работе характерными оптическими признаками проявления парамагнитной и ферромагнитной фаз?

3. В диссертации имеется ряд опечаток.

Сделанные замечания не снижают общей весьма высокой оценки работы.

Диссертация Кайсина Б. Д. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на мировом научном уровне. Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах (из списка ВАК), докладывались на российских конференциях и хорошо известны специалистам. Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По объёму, научной и практической значимости полученных результатов, работа отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Кайсин Борис Дмитриевич несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертации был представлен на семинаре лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН и отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН 30 апреля .2021, протокол № 1.

Отзыв составил зав. лаборатории спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН, профессор МФТИ Ю. Е. Лозовик -эксперт в области физики низкоразмерных систем и наноструктур, автор 700 научных работ (14 000 цитирований, $h=57$ –

<https://scholar.google.ru/citations?user=MGcdnWwAAAAAJ&hl=ru&oi=ao>), к.ф.-м.н.

(специальность 01.04.02, теоретическая физика) Ю. Е. Лозовик

Подпись зав. лабораторией Ю. Е. Лозовика заверяю

Ученый секретарь Института спектроскопии РАН

канд. физ.-мат. наук



[Handwritten signature]

Р.Р.Кильдиярова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук. Место нахождения: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5. тел. +7 (495) 851 0579 Эл. почта: isan@isan.troitsk.ru сайт: isan.troitsk.ru