

Отзыв официального оппонента  
о диссертации Александра Борисовича Ванькова  
«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»

Диссертация Ванькова А.Б. посвящена экспериментальному, в основном, исследованию многочастичных эффектов и коллективных возбуждений в сильновоздействующих двумерных электронных системах в квантующих магнитных полях. **Актуальность** темы исследования не вызывает сомнений. Используемые диссертантом методы оптической спектроскопии позволили получить богатую информацию об энергетическом спектре достаточно совершенных двумерных полупроводниковых систем (ДЭС) с сильным межэлектронным взаимодействием. Одной из наиболее информативных среди примененных методик является неупругое рассеяние света (НРС), особенно, в режиме оптического резонанса для энергий фотонов вблизи прямого края поглощения полупроводника. Эта бесконтактная методика позволила получить уникальную информацию о дисперсии нейтральных возбуждений системы, что особенно важно для понимания новых фаз, обнаруженных в сильнокоррелированных ДЭС, таких как ДЭС в прямозонных гетероструктурах  $MgZnO/ZnO$ . Важной частью диссертации является проведенное диссертантом моделирование энергетического спектра исследованных ДЭС современными непertурбативными численными методами, которые незаменимы при очень сильном кулоновском взаимодействии, когда теория ферми-жидкости Ландау оказывается неприменимой. В таких условиях сочетание детальной экспериментальной информации и расчёта энергетического спектра методом точной диагонализации позволяет понять физику многочастичных процессов, происходящих в сильнокоррелированных ДЭС.

Диссертация состоит из Введения, восьми глав, заключения и списка литературы, содержащего 138 наименований, общим объёмом 224 страницы с 92 рисунками и 1 таблицей.

Во **Введении** сформулированы цели диссертации и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** имеет обзорный характер.

Во **второй главе** описаны характеристики экспериментальных образцов гетероструктур  $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ , раздел 2.1, и применяемые оптические методики. В разделе 2.2 описаны детали проведения оптических экспериментов в интервале температур  $T \sim 0.35...4.2$  К и магнитных полей  $B = 0...15$  Тл. В разделе 2.3 изложены теоретические основы метода резонансного НРС и описана методика резонансного НРС в двухсветовой конфигурации.

**Третья глава** посвящена расчёту состояний системы в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) методом точной диагонализации. После краткого введения в разделе 3.2 изложен стандартный подход к точной диагонализации энергетического спектра ДЭС в режиме КЭХ. Приведены выражения для волновых функций электронов на поверхности тора в нормальном магнитном поле. Сформулированы принципы формирования базиса многочастичных конфигураций с учётом состояний на нескольких уровнях Ландау. В разделе 3.3 показано, что многоэлектронные конфигурации на уровнях Ландау имеют определенную иерархию, что позволило реализовать расчеты при современных вычислительных мощностях. Главным преимуществом указанного подхода является

возможность расчёта характеристик многоэлектронных состояний при сильном смешивании уровней Ландау за счет межэлектронного взаимодействия и беспрецедентно большой суммарной их ёмкости. Этим способом было проанализировано распределение электронов по уровням Ландау при факторе заполнения  $\nu = 1/3, 2/3, 1, 2$  и  $3$ . В разделе 3.4 приведены результаты расчёта спектра коллективных возбуждений со спином  $S = 1$  и  $S = 0$  в режиме дробного КЭХ при  $\nu = 1/3$ . В расчётах возбуждений с  $S = 0$  получена не только магноротонная ветвь, но и континуум квадрупольных колебаний электронной плотности с полным угловым моментом  $2$  - так называемых «магнитогравионов».

**Четвертая глава** посвящена исследованию магнитоплазменных и меж-подзонных возбуждений в ДЭС на основе гетероструктур  $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ . Раздел 4.1 является введением. Раздел 4.2 посвящен экспериментам по исследованию магнитоплазменных методом оптически детектируемого резонансного микроволнового поглощения. В частности, была зарегистрирована зависимость циклотронной массы от плотности электронов. Раздел 4.3 посвящён исследованию методом НРС коллективных и одночастичных возбуждений в нулевом магнитном поле в ДЭС на основе  $\text{ZnO}$ . В разделе 4.4 демонстрируется магнитополевая дисперсия спектра межподзонных заряженных возбуждений. Обнаружено, что их энергия чувствительна к изменению спиновой поляризации.

**Пятая глава** посвящена исследованию свойств коллективных спиновых возбуждений квантово-холловского ферромагнетика (КХФ) при  $\nu = 1$  и сильном межэлектронном взаимодействии, а также эффекту перенормировки обменной энергии электронов. Во вводном разделе 5.1 подчеркнуты отличия от известного случая КХФ со слабым кулоновским взаимодействием. Раздел 5.2 посвящен результатам прямого измерения обменного вклада в энергию циклотронных спин-флип экситонов и сопоставлению с расчётами методом точной диагонализации. В разделе 5.3 рассмотрены результаты альтернативного зондирования обменной энергии через дисперсию спиновых экситонов. В разделе 5.4 изложены результаты зондирования степени спиновой поляризации и величины обменно-кулоновской энергии КХФ в окрестности  $\nu = 1$ .

**Шестая глава** посвящена магнитооптическому исследованию ферромагнитных переходов в режиме целочисленного КЭХ. В разделе 6.1 приведены материальные параметры гетероструктур  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  и обсуждены их особенности, которые могут приводить к нетривиальным спиновым конфигурациям ДЭС. В разделе 6.2 рассмотрены особенности ферромагнитных переходов при четных и нечетных факторах заполнения при зондировании методами фотolumинесценции и НРС. В разделе 6.4 рассмотрена термодинамическая устойчивость фаз.

**В седьмой главе** рассмотрены свойства спиновых коллективных возбуждений в состоянии КЭХ  $\nu = 2$  с парамагнитным и ферромагнитным упорядочением. Особое внимание уделено нижайшим по энергии возбуждениям, которые определяют устойчивость фаз. Во вводном разделе 7.1 указаны предпосылки для возникновения необычной дисперсии спиновых возбуждений при  $\nu = 2$  в ДЭС с сильным кулоновским взаимодействием и большим зеemannовским расщеплением. В разделе 7.2 рассмотрены свойства нижайших спиновых возбуждений парамагнитной фазы и их роль в ферромагнитной неустойчивости. Экспериментальные исследования проводились методом НРС при  $T \approx 0.35\text{K}$ . В разделе 7.3 приведены результаты исследования нижайшего спинового возбуждения новой ферромагнитной фазы при  $\nu = 2$ .

**Восьмая глава** посвящена обнаружению орбитальных спиновых текстур в ДЭС на основе  $\text{ZnO}$  при отклонении от состояния КХФ с  $\nu = 1$ . Раздел 8.1 - введение. Указано, что известные модели возникновения топологических возбуждений - скирмионов и скирмионных решеток - неактуальны в данном материале, в котором обменная, зеemannовская и циклотронная энергии сопоставимы по величине. С другой стороны, происходит перенормировка расщеплений квазичастичных уровней Ландау, поэтому важную роль в формировании спиновых конфигураций ДЭС может играть орбитальная

степень свободы. В разделе 8.2 изложены результаты экспериментального зондирования магнитного порядка методом НРС через свойства спиновых коллективных возбуждений. Ферромагнитный переход при  $\nu \leq 2$  индуцировался наклоном магнитного поля к нормали образца. В разделе 8.3 обсуждаются результаты численного моделирования спиновых конфигураций и причины возникновения орбитальных спиновых текстур.

В **Заключении** сформулированы выводы диссертации. Выделим наиболее важные из них.

1. В двумерных электронных системах на основе ZnO из дисперсии размерных магнитоплазменных возбуждений извлечена циклотронная масса электронов. Обнаружено её существенное отклонение относительно зонного значения при изменении электронной концентрации в интервале  $n_s \sim 10^{11}-10^{12} \text{ см}^{-2}$  масса увеличивается до 20%.

2. В экспериментах по неупругому рассеянию света на спиновых коллективных возбуждениях обнаружена перенормировка масштаба обменной энергии квантово-холловского ферромагнетика  $\nu = 1$  для двумерных электронных систем в ZnO с очень сильным межэлектронным взаимодействием. Удельная обменная энергия оказалась порядка циклотронной энергии с соответствующей линейной зависимостью от магнитного поля. Результат подтвержден проделанными в работе численными расчетами.

3. В магнитооптических экспериментах на ДЭС в ZnO получены однозначные спектральные указания на спиновый порядок в районе перехода между парамагнитной и ферромагнитной фазами в режиме КЭХ с  $\nu = 2$ . Этим методом построена фазовая диаграмма и реализован подход оценки поверхностных долей обеих фаз вблизи точки перехода.

4. В ферромагнитной фазе в режиме КЭХ  $\nu = 2$  методом неупругого рассеяния света обнаружена аномальная отрицательная дисперсия ларморовских спиновых экситонов, которая не описывается параметром спиновой жесткости, а является результатом взаимодействия нескольких соседних спиновых мод. Численными расчётами показано, что в дисперсии такого спинового экситона возникает магниторотонный минимум. Показана возможность макроскопического накопления этих спиновых экситонов в ДЭС.

5. Оптимизирована численная схема точной диагонализации состояний КЭХ для класса задач, требующих учета сильного смешивания уровней Ландау. Разработка и использование оригинальной процедуры прореживания базиса многоэлектронных конфигураций позволило уменьшить трудоёмкость и ресурсоёмкость численной схемы на несколько порядков. Этот оригинальный подход оказался незаменимым для сопоставления вычислений с полученными экспериментальными результатами в режиме сильного квантования Ландау.

У оппонента нет существенных **замечаний**, хотя материал на пару вопросов найти удалось:

- 1) На рис.4.2 в магнитодисперсионной зависимости объемных магнитоплазменных волн используется гидродинамическая аппроксимация в пределе малых магнитных полей в пренебрежении эффектами электромагнитного запаздывания. Таковые даже не обсуждаются, хотя они могут быть важны. Не вполне понятно, что помешало диссертанту проделать подобные измерения при больших магнитных полях, или хотя бы оценить теоретически, например, погрешности в определении циклотронной массы.
- 2) На рис. 6.9с, глава 6, в описании спектра коллективных межподзонных возбуждений в условиях ферромагнитного перехода и фазового расслоения нигде не указано значение фактора заполнения.

Эти замечания не имеют принципиального характера и **не снижают общей оценки** работы. Все выносимые на защиту результаты являются **новыми, обоснованными и значимыми**. Нет сомнений, что они окажут (и уже оказывают) существенное влияние на развитие данной области. Работа выделяется очень высоким научным уровнем. Сочетание рафинированного эксперимента и продвинутого численного моделирования в этой очень сложной и конкурентной области физики производит сильнейшее впечатление.

**Список публикаций** диссертанта, приведенный в работе, включает 17 журнальных ссылок, вкл. Nature Comm. – 1 ссылка, Phys. Rev. B – 8 ссылок, Письма в ЖЭТФ – 7 ссылок, Appl. Phys. Lett - 1 ссылка. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Работа диссертанта 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 24.09.2013 №842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Ваньков Александр Борисович, вне всякого сомнения, **заслуживает** присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник отдела полупроводниковой электроники  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,  
доктор физико-математических наук по специальности  
01.04.10 - «Физика полупроводников и диэлектриков»

Волков Владимир Александрович  
«6» октября 2023 г.

Согласен на обработку персональных данных.

Волков Владимир Александрович  
«6» октября 2023 г.

Подпись Волкова Владимира Александровича заверяю  
Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
к.ф.-м.н. Чусов Игорь Иванович



Контактные данные оппонента: тел. 916-3384763, e-mail: [Volkov.V.A@gmail.com](mailto:Volkov.V.A@gmail.com).

Место работы: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.