

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

им. А.В. Ржанова

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИФП СО РАН)

пр.Академика Лаврентьева, д.13, г.Новосибирск, 630090

Тел./факс (383) 330-90-55/ 333-27-71

E-mail: ifp@isp.nsc.ru

http://www.isp.nsc.ru

ОКПО 03533808, ОГРН 1025403651283,

ИНН/КПП 5408100057/540801001

05.10.2023 № _____

На _____ № _____

"Утверждаю"

Директор ИФП СО РАН им. А.В.Ржанова
д.ф.-м.н., академик РАН А.В. Латышев



Подпись

"5" октября 2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации 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»

Одна из ключевых задач современной физики конденсированного состояния - это исследование многочастичных и коллективных явлений, а также эффектов взаимодействия и, в частности, их как можно яркое наблюдение в физическом эксперименте. И именно полупроводниковые двумерные электронные системы (ДЭС) вот уже несколько десятков лет являются основным, своего рода, полигоном указанной области физики. И центральное место на нем занимают плазменные и магнитоплазменные колебания и, конечно же, целочисленный и дробный квантовый эффект Холла (КЭХ). Докторская диссертация А.Б. Ванькова хорошо иллюстрирует сказанное выше. Она посвящена решению вопроса о том, как эффекты взаимодействия и корреляции проявляется в оптическом отклике новых, высококачественных и интереснейших ДЭС, реализованных относительно недавно в полупроводниковых гетероструктурах $MgZnO/ZnO$, имеющих подвижность электронов до нескольких миллионов cm^2/Vs и относительно большую эффективную массу около $0.3m_0$, позволяющую достигать высоких значений ($r_s \gg 1$) параметра Вигнера-Зейтца уже при концентрациях $10^{11} cm^{-2}$. Поэтому **актуальность темы** его диссертационной работы не вызывает никаких сомнений.

Благодаря использованию указанной выше ДЭС диссертантом получен целый ряд принципиально новых результатов, связанных 1) с особенностями энергетического спектра

многочастичных и коллективных состояний, включая плазмоны и магнитоплазмоны, 2) с формированием многочисленных спиновых конфигураций и 3) с трансформацией различных квантовых фаз и квазичастичных возбуждений в режиме квантового эффекта Холла. Нельзя не отметить, что многие экспериментальные результаты, к примеру, переходы между ферромагнитным и парамагнитным упорядочением, диссертанту удалось описать собственными теоретическими расчётами с использованием метода точной диагонализации. Полученные диссертантом результаты дают новую пищу для размышлений о свойствах двумерных коллективных возбуждений, перенормировках параметров ферми-жидкостных квазичастиц, преобразованиях энергетического спектра систем, находящихся в режиме квантового эффекта Холла, а также о механизмах фазовых переходов в режиме КЭХ и роли кулоновского взаимодействия.

Ниже идет более подробный анализ диссертационной работы А.Б. Ванькова.

В первой главе даётся литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований многочастичных процессов в двумерных электронных системах. В ней диссертант с немалым энтузиазмом рассказывает и о функции Лафлина и о теории композитных фермионов, и скирмионах, и о квантовых ферромагнетиках, и о спиновых текстурах и т. д. В обзоре также дается анализ проведенных ранее исследований коллективных возбуждений двумерных систем. Заключительная часть обзора посвящена описанию основных свойств ДЭС в полупроводниковых гетероструктурах $MgZnO/ZnO$, экспериментальное исследование оптического отклика которых и составляет основное содержание диссертации.

Вторая глава дает описание основного экспериментального метода, заключающегося в анализе спектров фотолюминесценции и неупругого рассеяния света при возбуждении межзонных оптических переходов в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника, в нашем случае, в ОПЗ окиси цинка в гетеропереходе $MgZnO/ZnO$. Важной частью указанной главы является Таблица 2.1, в которой приведены основные характеристики экспериментальных образцов, являющихся достаточно уникальными, и обладание которыми является, пусть и весьма и весьма косвенным, свидетельством высокой квалификации диссертанта.

Третья глава посвящена изложению использованных в работе приемов численного моделирования спектра двумерных электронных систем. После краткого введения о возможностях и ограничениях метода точной диагонализации для расчёта энергетического спектра конечного числа электронов в режиме КЭХ, описан разработанный в диссертации оптимизированный подход, который необходим и оправдан для задач с сильным кулоновским взаимодействием и смешиванием уровней Ландау. Оптимизация вычислений достигается за счёт сильного упрощения базиса многочастичных конфигураций при конечном значении параметра смешивания. При уменьшении трудоёмкости вычислений на несколько порядков явно продемонстрирована сходимость вычислительного метода. К физически значимым результатам

можно отнести получение функции распределения электронов по уровням Ландау в зависимости от фактора заполнения в режиме сильного кулоновского смешивания (ферми-жидкость). Новый подход к численной диагонализации использован для описания результатов в ряде последующих глав диссертации. Следует отметить, что хотя диссертация написана экспериментатором и является экспериментальной работой, данная глава вполне соответствует уровню квалифицированного теоретика. Такой универсализм - исключительная редкость сейчас и свидетельствует о таланте диссертанта.

В четвертой главе диссертант описывает эксперименты по исследованию плазменных, магнитоплазменных и межподзонных возбуждений в двумерных электронных системах в гетероструктурах MgZnO/ZnO на основе описанной во второй главе методики. В частности, приведены результаты экспериментов по оптическому детектированию резонансного микроволнового поглощения, когда информация о плазменном резонансе получается не из прямого микроволнового отклика ДЭС, а из модуляции плазменным резонансом сигнала фотолюминисценции. Оригинально, ничего не скажешь. Ранее подобная методика была использована в GaAs ДЭС. В анализируемой главе диссертант демонстрирует ее эффективность и для ДЭС в MgZnO/ZnO. В результате им обнаружен небольшой рост циклотронной эффективной массы с увеличением концентрации электронов, что, скорее всего, связано с эффектами непараболичности, но диссертанту больше нравится объяснять сей факт возможным влиянием кулоновского взаимодействия. Заключительная часть четвертой главы посвящена экспериментам по НРС, из которых была извлечена энергия межподзонных переходов между основной и первой подзоной размерного квантования в приповерхностной ОПЗ окиси цинка, а также ее зависимость от концентрации электронов. В этой же части приводятся эксперименты по влиянию на межподзонные переходы магнитного поля и сделан вывод о том, их изучение может дать информацию о характере спинового упорядочения.

Предметом **пятой главы** является экспериментальное исследование ДЭС в режиме КЭХ, когда фактор заполнения (ν) равен единице, то есть когда электронами полностью заполнен основной уровень Ландау, и система представляет собой спин-поляризованное состояние, называемое многими исследователями КЭХ а вместе с ними и диссертантом квантово-холловским ферромагнетиком. В этом состоянии в спектре НРС наблюдается два пика, которые диссертант связывает со спиновым экситоном (SE) и циклотронным спин-флип экситонным возбуждением (CSFE). Поведение этих пиков в окрестности $\nu = 1$, а также в зависимости от концентрации электронов детально обсуждается в главе, и на основе этого автор делает вывод, что величина обменного вклада в формирование CSFE велика и сравнима с циклотронной энергией. Также сделан вывод, что при небольшом отклонении ν в сторону уменьшения система сохраняет свою практически полную поляризацию, тогда как при таком же отклонении в сторону увеличения происходит ее медленная деполяризация.

В **шестой главе** режим КЭХ исследуется уже при факторе заполнения $\nu = 2$, когда в системе можно реализовать ферромагнитные переходы. И тогда, как утверждает автор, необходимо использовать наклонные магнитные поля (В). В этом режиме основным источником информации являются все те же спектры фотолюминисценции и НРС, измеренные при различных углах наклона В. Подробный и, надо сказать изрядно многословный, анализ этих спектров позволяет сделать диссертанту следующие основные выводы: 1) наблюдаются резкие изменения как в спектрах фотолюминисценции, так в спектрах НРС, свидетельствующие о переходе между парамагнитной и ферромагнитной фазами ДЭС; 2) это позволяет построить фазовую диаграмму зависимости угла критического наклона от концентрации электронов; 3) при низких концентрациях $N_s < 1.8 \cdot 10^{11}$ происходит спонтанный ферромагнитный переход даже в присутствии только нормального магнитного поля.

Седьмая глава посвящена свойствам ДЭС при все том же четном факторе заполнения $\nu = 2$, но в ней речь идет уже о спиновых коллективных возбуждениях, то есть о спиновых экситонах и циклотронных спин-флин экситонных возбуждениях, уже исследовавшихся при $\nu = 1$. Основные выводы диссертации формулируются уже таким образом: 1) в окрестности точки неустойчивости энергетически выгодны мульти-спин-флип возбуждения, 2) дисперсионные свойства спиновых возбуждений указывают на наличие магниторотонных минимумов в дисперсии нижних спиновых мод, 3) в ферромагнитной фазе при $\nu = 2$ экспериментально обнаружено макроскопическое накопление спиновых экситонов при резонансном фотовозбуждении.

В последняя **восьмой главе** описаны эксперименты при факторе заполнения $1 < \nu \leq 1.5$, то есть когда полностью заполнен основной уровень Ландау и частично заполнен первый. В этих условия в спектрах НРС наряду с пиком, соответствующему спиновому экситону, при планом увеличении ν от 1 до 1.31 обнаружено возникновение еще одной особенности и ее тонкое взаимодействие с основным пиком: при $1 < \nu < 1.01$, то есть в состоянии близком к полной спиной поляризации существует только SE экситон, при $\nu = 1.11$ появляется пик при меньшей энергии, который при $\nu = 1.17$ выглядит равным основному, а при $\nu = 1.31$ остается единственным. На основе численного моделирования описанного поведения сигнала НРС сделан вывод о возникновении орбитальных спиновых текстур в исследуемой ДЭС.

Переходим к замечаниям. Начнем с имеющих общий характер. Основной экспериментальный метод, используемый в диссертации, связан с возбуждением структуры, содержащую двумерную электронную систему, межзонным светом с энергией в несколько электроновольт. Во-первых, очевидно, что такое излучение приводит к тому, что, система выводится из состояния равновесия и наряду с тонкими эффектами межэлектронного взаимодействия, которые являются предметом диссертации, в ней возникают интенсивные генерационно-рекомбинационные процессы, могущие дать просто паразитные сигналы. И их хотя бы качественный анализ крайне необходим. Но в диссертации об этом ни слова. Во-вторых, поскольку в работе речь идет об экспериментах

при сверхнизких температурах около 0.3 К, вопрос о том не перегревает ли ДЭС падающее на него излучение требует серьезного изучения. Однако диссертант ограничивается лаконичным заявлением «Плотность мощности была значительно меньше $1\text{ мВт}/\text{см}^2$, что предотвращало перегрев ДЭС и проверялось по отсутствию уширения чувствительных спектральных линий», хотя, как хорошо известно из транспортных экспериментов, даже мощности порядка $1\text{ мкВт}/\text{см}^2$ приводят к заметному перегреву ДЭС при температурах ниже 1 К.

Теперь более конкретные замечания.

В обзоре диссертации слишком много внимания уделено описанию ДКЭХ, вообще говоря не имеющего прямого отношения к самой диссертации. С другой стороны ни слова не говорится о свойствах ДЭС в Si/SiGe квантовых ямах, чьи параметры (эффективная масса и подвижность) наиболее близки к ДЭС, исследуемой автором.

На стр.40 написано, что при факторах заполнения $\nu \ll 1$,...и остается гадать, что автор подразумевает под этим обозначением, кстати, встречающимся в диссертации не только на указанной странице.

На рис.1.15 автор, комментируя поведение подвижности говорит, что рост подвижности с увеличением концентрации связан с рассеянием на примесях, а падение с со случайными включениями Mg, хотя, скорее всего, оно вызвано хорошо известным рассеянием на неровностях.

В конце второй главы, посвященной образцам и методике эксперимента автор пишет: "спектральные линии НРС проверялись по поляризационным правилам отбора. Для этого два одинаковых линейных поляризатора помещались между торцами обоих светодиодов и поверхностью образца и ориентировались либо параллельно либо ортогонально друг другу. В первом случае регистрировались возбуждения зарядовой плотности, а во втором - спиновой плотности". И никаких пояснений сказанному, хотя именно в этом месте следовало бы подробно рассказать о физике НРС на указанных возбуждениях.

Вызывает вопрос правая панель на рис.2.2. Вместо вертикальных переходов на нем показаны не соответствующие действительности наклонные переходы.

На стр. 66 читаем: "Электронная концентрация, извлеченная из магнитотранспортных данных, согласуется в пределах 6%, с извлеченным из данных по ФЛ. Причины расхождения - поверхностная неоднородность и эффект постоянной ФП". Во-первых, никакого равенства в величинах концентрации быть не должно, просто потому что межзонный свет, освещающий ОПЗ, увеличивает концентрацию электронов в яме. Во-вторых, рост их концентрации и приводит к возникновению ФП, а не наоборот, как можно подумать из слов диссертанта.

В качестве замечания к третьей главе, отметим, что несмотря на применимость предложенной усовершенствованной вычислительной процедуры как к целочисленному, так и к дробному КЭХ, в работе не обсуждается (и даже не упоминается) важный вопрос о результатах использования метода для нахождения величины щелей в дробном КЭХ при различных факторах заполнения.

На стр. 128 написано: "и в основном состоянии...заполнена только одна из Ферми-сфер (рис.5.9а)". Смотрим на указанный рисунок и не видим никаких сфер, а только два диска.

На стр. 172 читаем "энергия спинового возбуждения в ферромагнитной фазе $\nu = 2$ ", а спустя несколько строк "в идеальной парамагнитной фазе $\nu = 2$ ". Что бы это значило?

Текст диссертации грешит риторическими излишествами. Видно, что ее автору до такой степени нравится и область его исследований и сама его диссертация, что он часто не может удержаться в рамках сдержанного академического стиля. И тогда мы читаем: «оправдывает себя» вместо просто «допустимым является», «искусственное ограничение» вместо просто «ограничение», «традиционной метрикой» вместо просто «мерой», «материальных платформ» вместо просто «систем», «каскад спектров» вместо просто «спектры», «созвучная температурная динамика»,...но более всего впечатлило «особенно много загадок нащупывается». Также в тексте нередко встречаются жаргонные словечки: «окололинейно», «обнуляются», «четырекратно переоценивать», «переигрывать». Не лишен текст и стилистических несуразностей: «в состоянии дробного КЭХ произведен расчет», "необычное поведение масштаба обменной энергии"


Оценивая диссертацию в целом можно сказать, что благодаря ей в физике низкоразмерных электронных систем появилось еще одно весьма интересное и, по-своему, глубокое исследование эффектов сильного межчастичного взаимодействия на примере ДЭС в полупроводниковых гетероструктурах $MgZnO/ZnO$, достаточно новой и вызывающей в настоящее время заметное внимание всех специалистов в области физики низкоразмерных электронных систем. Замечания носят исключительно частный характер и не затрагивают ни основных выводов диссертации, ни защищаемых положений.

Достоверность и обоснованность полученных диссертантом результатов очевидны. Это подтверждается публикациями ее результатов в ведущих физических журналах мира, начиная с Писем в ЖЭТФ и кончая PRB и Nature Comm., а также выступлениями с многочисленными докладами как на российских, так и на международных конференциях. Полученные в диссертации результаты привлекли к себе достаточно пристальное внимание многих ведущих научных (и экспериментальных и теоретических) групп мира и обсуждались на многочисленных форумах. Они вносят заметный вклад в физику конденсированного состояния. Нет никаких сомнений, что по актуальности, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа Ванькова А. Б. «Оптическая спектроскопия

сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Ваньков Александр Борисович, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8.- «Физика конденсированного состояния»

Доклад Ванькова А. Б. по материалам диссертации заслушан и обсужден на семинаре Института физики полупроводников СО РАН 4 октября 2023 г. На семинаре присутствовало 23 человека. Из них д.ф.-м.н. 8 чел. , к.ф.-м.н. - 10 чел. Отзыв подготовлен главным научным сотрудником лаборатории теоретической физики ИФП СО РАН, доктором физико-математических наук, академиком РАН Чапликом Александром Владимировичем и заведующим лабораторией физики низкоразмерных электронных систем, доктором физико-математических наук, член-корреспондентом РАН Квоном Зе Доном и одобрен на заседании семинара Института физики полупроводников СО РАН
4 октября 2023 г.

Главный научный сотрудник лаборатории
теоретической физики ИФП СО РАН,
доктор физико-математических наук,
академик РАН Чаплик Александр Владимирович
Адрес: Россия, г.Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13
Тел: 383-333-32-64
E-mail: chaplik@isp.nsc.ru
Согласен на передачу персональных данных

 Чаплик А.В.

Заведующий лабораторией физики низкоразмерных
электронных систем ИФП СО РАН
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН Квон Зе Дон
Адрес: Россия, г.Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13
Тел: 383-330-67-33
E-mail: kvon@isp.nsc.ru
Согласен на передачу персональных данных

 Квон З.Д.

Подписи Чаплика А.В. и Квона З. Д. удостоверяю:

Ученый секретарь ИФП СО РАН, к.ф.-м.н.  Аржанникова С.А.

